

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Tese de Doutorado

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E DE
DURABILIDADE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS
RECICLADOS COM INCORPORAÇÃO DE CIMENTOS
ÁLCALI ATIVADOS

Alessandro Graeff Goldoni

Passo Fundo

2022



CIP – Catalogação na Publicação

G621a Goldoni, Alessandro Graeff
Análise do comportamento mecânico e de durabilidade
de pavimentos flexíveis reciclados com incorporação de
cimentos álcali ativados / Alessandro Graeff Goldoni. –
2023.

146 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa.
Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade
de Passo Fundo, 2023.

1. Geopolímero. 2. Restauração profunda. 3. Fadiga.
I. Rosa, Francisco Dalla, orientador. II. Título.

CDU: 625.85

Catalogação: Bibliotecário Luís Diego Dias de S. da Silva – CRB 10/2241

Universidade de Passo Fundo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
Infraestrutura e Meio Ambiente

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E DE DURABILIDADE DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS RECICLADOS COM INCORPORAÇÃO DE
CIMENTOS ÁLCALI ATIVADOS**

Alessandro Graeff Goldoni

Passo Fundo
2022

Alessandro Graeff Goldoni

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E DE DURABILIDADE DE
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS RECICLADOS COM INCORPORAÇÃO DE CIMENTOS
ÁLCALI ATIVADOS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil sob a orientação do Professor Doutor Francisco Dalla Rosa.

Comissão examinadora:

Prof.^a Dra. Michéle Dal Toé Casagrande (UNB)
Prof. Dr. Nilo Cesar Consoli (UFRGS)
Prof.^a Dra. Adriana Augustin Silveira (UPF)
Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto (PPGEng/UPF)

Passo Fundo

2022

*“There goes my hero
Watch him as he goes
There goes my hero
He’s ordinary”*

(Dave Grohl, Nate Mendel, Pat Smear, 1998)

Dedico este trabalho a minha filha Antônia.

AGRADECIMENTOS

Palavras nunca irão ser suficientes para retribuir aqueles que me fizeram chegar até aqui. Os mais próximos sabem que este trabalho chega ao fim depois de ter quase desistido por pelo menos duas vezes. Por isso, agradeço primeiro ao meu orientador Francisco que me fez acreditar que iríamos terminar a pesquisa. Minha mãe Laura (*in memoriam*), minha avó Abegahy (*in memoriam*) e minha avó Odila (*in memoriam*), mulheres fortes que não puderam ver uma de suas conquistas terminar. Meu pai Volnei e minha tia Volnete, testemunhas fiéis e suporte para todos os momentos. Minha esposa Taís que esteve ao meu lado nos momentos difíceis que o dia a dia nos faz enfrentar. Família, amigos, colegas, pessoas que sempre estiveram ao meu lado. Colegas de trabalho do CETEC que colocaram a mão na massa para completar o programa experimental. Alunos, orientados e bolsistas que participaram ativamente de todo o processo durante os últimos anos. Universidade de Passo Fundo pelo apoio financeiro.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo de testar uma cimentação alternativa para bases de pavimentação. Desta maneira realizou-se o desenvolvimento de um geopolímero com as propriedades necessárias para aplicação em bases recicladas cimentadas. A constante preocupação com a redução do consumo de materiais em obras de infraestrutura, faz com que as manutenções e reconstruções de pavimentos com o reuso do material antigo esteja em crescente desenvolvimento. O aumento das cargas transportadas nas rodovias brasileiras faz com que as solicitações sobre o pavimento aumentem e exijam maior capacidade de suporte. Neste contexto, a cimentação de material reciclado e reincorporação como base e/ou sub-base atenda essa necessidade e, ao mesmo, tempo mitiga o passivo ambiental do material reciclado depositado em bota fora, bota espera ou depositado a beira da rodovia. O programa experimental propõe a utilização de cinza volante como material precursor, hidróxido e silicato de sódio como ativadores. Os resultados apresentam valores de resistência mecânica que atendem aos requisitos mínimos exigidos pelo DNIT para este tipo de material, sendo que algumas misturas obtiveram valores superiores a 30MPa com 365 dias de cura. Ao final do trabalho, realizou-se avaliações de durabilidade e vida de fadiga, onde conclui-se que é possível e viável tecnicamente a utilização de cimentações alternativas em base recicladas em restauração profunda de pavimentos.

Palavras-chave: geopolímero; restauração profunda; fadiga.

ABSTRACT

The present work aimed to test an alternative cementation for paving bases. In this way, the development of a geopolymer with the necessary properties for application in recycled cemented bases was carried out. The constant concern with reducing the consumption of materials in infrastructure works makes the maintenance and reconstruction of pavements with the reuse of old material in increasing development. The increase in loads transported on Brazilian highways makes the demands on the pavement increase and demand greater support capacity. In this context, cementing recycled material and reincorporating it as a base and/or sub-base meets this need and, at the same time, mitigates the environmental liability of recycled material deposited in dumps, dumps or deposits on the side of the road. The experimental program proposes the use of fly ash as precursor material, hydroxide and sodium silicate as activators. The results present mechanical strength values that meet the minimum requirements required by the DNIT for this type of material, with some mixtures reaching values greater than 30MPa after 365 days of curing. At the end of the work, evaluations of durability and fatigue life were carried out, where it was concluded that it is possible and technically feasible to use alternative cements based on recycled in deep pavement restoration.

Keywords: geopolymer; deep restoration; fatigue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicações dos materiais álcali ativados para diferentes relações Si/Al	16
Figura 2 - Organização e estrutura química dos materiais álcali ativados	17
Figura 3- Modelo conceitual da reação de álcali ativação.....	19
Figura 4 – Número de artigos/ano sobre materiais álcali ativados na pavimentação	35
Figura 5- Comportamento típico de materiais de pavimentação submetidos a carregamentos cíclicos.....	43
Figura 6 - (a) Fadiga e (b) fenômeno da deformação permanente	44
Figura 7- Etapas do método da pesquisa.	49
Figura 8 - Localização do trecho de extração do material fresado	50
Figura 9 - Curvas granulométricas do fresado, brita 3/4", 3/8" e pó de pedra	51
Figura 10 - Curvas granulométricas do fresado com e sem a presença de betume	54
Figura 11 - Cinza volante utilizada.....	57
Figura 12 – Composição mineralógica da Cinza volante	59
Figura 13 - Aspecto do silicato de sódio empregado.....	60
Figura 14 - Curva granulométrica do material fresado e faixa C do DNIT.....	61
Figura 15 - Curva granulométrica da mistura com 20% de fresado	62
Figura 16 - Curva granulométrica da mistura com 45% de fresado	63
Figura 17 - Curva granulométrica da mistura com 70% de fresado	63
Figura 18 - Mistura dos materiais antes da adição de água no Ensaio Proctor	65
Figura 19 - Curva de compactação das composições	66
Figura 20 – Compactação dos corpos de prova 15x15x45	70
Figura 21 – Corpos de prova 15x15x45	71
Figura 22 - Equipamento para ensaio de carregamentos cíclicos.....	72
Figura 23 – Tela do software utilizado para os ensaios estáticos e cíclicos	73
Figura 24 - Resultados de RCS da cimentação com cimento Portland	77
Figura 25 - Aspecto do geopolímero logo após o processo de homogeneização.....	79
Figura 26 - Ensaio de tração na flexão	80
Figura 27 - Boxplot da resistência e relação solução/precursor	81
Figura 28 - Aspecto visual dos corpos de prova curados em estufa.....	83
Figura 29 - Resistência a compressão do geopolímero em diferentes tempos e temperaturas.	83
Figura 30 - Resistência à tração na flexão do geopolímero em diferentes tempos e temperaturas	84

Figura 31 - Prensa EMIC em ensaio de compressão simples.....	86
Figura 32 - Resistência à compressão simples de material fresado cimentado com geopolímero	87
Figura 33 - Corpos de prova com teor de 30% de geopolímero aos 7 dias.....	88
Figura 34 - Corpos de prova com teor de 20% de geopolímero aos 7 dias.....	88
Figura 35 - Corpos de prova com teor de 10% de geopolímero aos 7 dias.....	89
Figura 36 - Mistura dos materiais para cimentação do fresado com geopolímero.....	90
Figura 37 – Perda de massa ao longo de ciclos de molhagem e secagem.....	94
Figura 38 – Resistência à compressão ao longo de ciclos de molhagem e secagem.....	96
Figura 39 – Perda de massa ao longo de ciclos para RAP com geopolímero	98
Figura 40 – Resistência mecânica ao longo de ciclos para RAP com geopolímero.....	100
Figura 41 – Síntese da análise estatística da resistência para Cimento Portland.....	102
Figura 42 – Síntese da análise estatística dos resultados de resistência para geopolímero	102
Figura 43 – Diagrama matricial para os resultados categorizados de cimento	103
Figura 44 – Diagrama matricial para os resultados categorizados de geopolímero	103
Figura 45 – Resultados de módulo estático para cimento Portland.....	104
Figura 46 – Resultados de módulo estático para geopolímero	105
Figura 47 – Resultados normalizados de tensão de ruptura para cimento Portland.....	106
Figura 48 – Resultados normalizados de tensão de ruptura para geopolímero	107
Figura 49 – Resultados normalizados de tensão de ruptura comparativo	108
Figura 50 – Resultados de fadiga para cimento Portland	110
Figura 51 – Resultados de fadiga para geopolímero	111
Figura 52 – Resultados de fadiga comparativo	112
Figura 53 – Obtenção do número de ciclo para cada mistura	113
Figura 54 – Fadiga normalizada para Cimento Portland.....	114
Figura 55 – Fadiga normalizada para Cimento Portland.....	115
Figura 56 – Fadiga normalizada comparativa completa.....	116
Figura 57 – Fadiga normalizada comparativa	117
Figura 58 – Equações de fadiga.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Razões molares ideais entre os reagentes da mistura para álcali ativação	20
Tabela 2 – Classificação dos processos de reciclagem de pavimentos	28
Tabela 3 – Estudos envolvendo aplicação de materiais álcali ativados de cinza volante em pavimentação	37
Tabela 4 - Resultado do teor de betume do material fresado	53
Tabela 5 - Resultado de Massa específica e absorção	55
Tabela 6 - Fluorescência de Raios-x do Metacaulim	56
Tabela 7 - Características físico-químicas do Silicato de Sódio	60
Tabela 8 - Composições para 20, 45 e 70% de fresado	62
Tabela 9 - Dados utilizados na moldagem dos corpos de prova	67
Tabela 10 - Exemplo de dosagem para moldagem de corpo de prova	68
Tabela 11 - Resultados preliminares cimentação com Cimento Portland	76
Tabela 12 - Materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova de geopolímero	78
Tabela 13 - Resultados da mesa de consistência para o geopolímero	78
Tabela 14 - Tempos de cura e temperatura testados	82
Tabela 15 - Resultados do ensaio de Proctor para geopolímero de cinza	91
Tabela 16 - Valores médios de RCS para fresado com geopolímero de cinza volante	92

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	52
Equação 2	52
Equação 3	54
Equação 4	54
Equação 5	54
Equação 6.....	58
Equação 7	66
Equação 8.....	69
Equação 9.....	80

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Materiais álcali ativados	15
2.1.1.	Definição	15
2.1.2.	Classificação	16
2.1.3.	Caracterização	17
2.1.4.	Mecanismos de ativação	18
2.1.5.	Precursores	20
2.1.6.	Cura	25
2.2.	Restauração de pavimentos	26
2.2.1.	Reciclagem de misturas asfálticas	27
2.2.2.	Fresagem	29
2.2.3.	Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland	30
2.2.4.	Estabilização de solos	32
2.2.5.	Estabilização de material asfáltico fresado álcali ativado	35
2.2.6.	Comportamento mecânico de camadas cimentadas	41
2.2.7.	Avaliação do ciclo de vida de pavimentos	44
3.	METODOLOGIA DA PESQUISA	49
3.1.	MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA	50
3.1.1.	Material Fresado	50
3.1.2.	Cimento Portland	55
3.1.3.	Precursores	55
3.1.4.	Ativadores	59
3.1.5.	Água	60
3.2.	Dosagem das Misturas	61

3.2.1.	Dosagem do material fresado com cimento	64
3.2.2.	Dosagem do material fresado com geopolímero	64
3.3.	Ensaio Mecânicos	65
3.3.1.	Ensaio de compactação	65
3.3.2.	Resistência à compressão simples	67
3.3.3.	Ensaio de tração na flexão e módulo estático	69
3.3.4.	Ensaio de módulo de resiliência	70
3.4.1.	Molhagem e secagem	73
4.	RESULTADOS	75
4.1.	Cimentação do material fresado e Cimento Portland	75
4.2.	Fabricação de Geopolímero Piloto	77
4.3.	Cimentação de fresado com Geopolímero de Matacaulim	85
4.4.	Cimentação de Frezado com Geopolímero de Cinza Volante	89
4.5.	Durabilidade via ensaio de molhagem e secagem	92
4.6.	Tração da flexão e Módulo Estático	104
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
	REFERÊNCIAS	122
	ANEXO A – RESULTADOS ESTATÍSTICOS	143

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico de um país frequentemente é vinculado à qualidade da infraestrutura disponível para as mais diversas atividades econômicas. No Brasil, a matriz de transporte tem uma participação expressiva do modal rodoviário, que concentra cerca de 65% da movimentação de mercadorias e de 95% da de passageiros (CNT, 2021).

Em valores quantitativos, a CNT (2021) levantou dados que mostram o Brasil com um total de 109103 km de rodovias, das quais apenas 12,4% são pavimentadas. Além disso, quanto ao estado geral, 61,8% foram classificadas em regular, ruim e péssimo. Esse cenário atrelado ao crescente aumento do volume de tráfego e das cargas dos veículos apontam para a necessidade de intervenções nas rodovias e principalmente para o desenvolvimento de novas técnicas e materiais com melhor desempenho ambiental e econômico.

Do ponto de vista ambiental, diversos tipos de agregados reciclados vêm sendo utilizados em pavimentos, como por exemplo o pavimento asfáltico reciclado (RAP) (ANTUNES *et al.*, 2019). Particularmente, quando se trata de manutenção das rodovias, normalmente são utilizadas as técnicas de fresagem e reconstrução do pavimento deteriorado gerando um volume muito significativo de material fresado que ainda é descartado em aterros. O material fresado pode ser considerado um material nobre e se utilizado para a construção de novos pavimentos pode reduzir o custo geral das seções do pavimento em 40% a 46% (SINGH *et al.*, 2018; DEBBARMA *et al.*, 2019).

Além disso, no Brasil, a Resolução nº 14, de 8 de julho de 2021 dispõe que todos os projetos de engenharia de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) devem incluir o reaproveitamento do RAP eventualmente produzido no empreendimento.

No entanto, apesar da sua clara aplicabilidade, a utilização de elevados teores de RAP para a construção de novas camadas pode levar a falta adesão entre os grãos e, portanto, perda das propriedades mecânicas. Nesse sentido, o uso de estabilizadores pode proporcionar uma maior resistência a compressão e ao impacto e uma melhor integridade das camadas (AVIRNENI *et al.*, 2016; ARULRAJAH *et al.*, 2014). O cimento Portland comum tem sido amplamente aplicado como material estabilizador em projetos de pavimentos, atuando na ligação de partículas por meio de reações cimentícias, aumentando a resistência e rigidez, reduzindo a deformação e melhorando a permeabilidade (NAWAZ *et al.*, 2020).

Porém, devido a intensa utilização de recursos naturais e as altas taxas de emissão de gás carbônico, a produção desses ligantes convencionais se torna prejudicial ao meio ambiente. O

último relatório publicado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2020) indica uma produção anual de 61502000 toneladas de cimento em 2020. Os dados apontam ainda uma redução de 19% nas emissões de carbono entre os anos de 1990 e 2019, mas ainda são emitidos 564 kg de CO₂ na atmosfera para a produção de uma tonelada de cimento (SNIC, 2020). Além disso, Quase 8% da emissão global de CO₂ é produzida pela indústria do cimento (PRESTON e LEHNE, 2018).

Uma solução para a reversão desse cenário é o uso de resíduos e/ou subprodutos industriais ou domésticos com propriedades aglomerantes como cinza volante (ZHUANG *et al.*, 2016; PHOO-NGERNKHAM *et al.*, 2015), escoria granulada de alto forno (AWOYERA e ADESINA, 2019), lodo de tratamento de água (GERALDO *et al.*, 2017), cinza de casca de arroz (BERNAL *et al.*, 2012; TCHAKOUTÉ *et al.*, 2016; LUUKKONEN *et al.*, 2018; TONG *et al.*, 2018; MEJÍA *et al.*, 2013; STURM *et al.*, 2016), cinza de bagaço de cana de açúcar (BRUSCHI *et al.*, 2021; BRUSCHI *et al.*, 2021b; PEREIRA *et al.*, 2021), cal de carbureto (QUEIRÓZ *et al.*, 2022; BRUSCHI *et al.*, 2022; CARVALHO *et al.*, 2022) e cal de casca de ovo (CONSOLI *et al.*, 2021; TONINI *et al.*, 2021). Entretanto o uso de estabilizantes ricos em cálcio (Ca) pode causar retração e rachaduras no pavimento, sendo muitas vezes utilizada a álcali ativação desses produtos para atender as exigências normativas de bases e sub-bases de pavimentos (AVIRNENI *et al.*, 2016b; HOY *et al.*, 2018).

Os ligantes produzidos a partir da álcali ativação são produto da reação entre um mineral de aluminossilicato (precursor), com uma solução alcalina (ativador) (PROVIS e BERNAL, 2014). Os ligantes álcali ativados surgiram nas últimas três décadas como materiais substitutos do cimento Portland para algumas aplicações (PROVIS, 2018) e estão rapidamente se tornando opções eficazes, considerando sua menor emissão de dióxido de carbono em comparação ao cimento Portland (QUEIRÓZ *et al.*, 2022). McLellan *et al.* (2011) constataram uma redução de aproximadamente 50% das emissões de CO₂ em comparação com o cimento Portland. Com relação aos custos, os autores afirmam que pode facilmente se igualar, ou até reduzir dependendo da disponibilidade de matéria prima.

Embora os ligantes ativados por álcalis sejam considerados uma opção mais sustentável quando comparados ao OPC (HABERT *et al.*, 2011; TURNER e COLLINS, 2013; VAN DEVENTER *et al.*, 2010), é importante destacar que o processo de produção de um dos precursores mais utilizado, o metacaulim, também contribui para a geração de CO₂.

Os materiais álcali ativados são produzidos pela ativação alcalina de materiais ricos em sílica e alumina. De uma forma geral as cinzas volantes são constituídas por óxidos de silício (SiO₂), de alumínio (Al₂O₃), de ferro (F₂O₃) e de cálcio (CaO) (MEHTA *et al.*, 1994). Dessa

forma, muitos pesquisadores destacam o potencial uso da cinza volante para o desenvolvimento de materiais álcali ativados (DIAZ-LOYA *et al.*, 2011; PALACIOS *et al.*, 2019; ZHUANG *et al.*, 2016; GHARZOUNI *et al.*, 2018). Os materiais álcali ativados a base de cinza volante se destacam por desenvolver resistência à temperatura ambiente (THOMAS *et al.*, 2016; FANG *et al.*, 2020; CHANG, 2003; NEDELJKOVIC *et al.*, 2018; SUN *et al.*, 2022) e por serem resistentes a altas temperaturas (LEE e SHANG, 2014; GUERRIERI e SANJAYAN, 2010; KONG, 2010; YANG *et al.*, 2019; KONG e SANJAYAN, 2008).

Quanto às aplicações na área de pavimentação, ligantes álcali ativados já vem sendo utilizados como agente estabilizador em combinação com RAP (TABYANGA *et al.*, 2021; SYED *et al.*, 2022; EDEH *et al.*, 2012; AL-HDABI *et al.*, 2016; KANG *et al.*, 2015; HORPIBULSUK *et al.*, 2017; SUKPRASERT *et al.*, 2021; KANG *et al.*, 2015; JALLU *et al.*, 2020; HOY *et al.*, 2018; SARIDE *et al.*, 2016; AVIRNENI *et al.*, 2016; ADHIKARI *et al.*, 2020).

Embora os ligantes álcali ativados tenham boas perspectivas de aplicação no setor de pavimentação, ainda faltam pesquisas sistemáticas e abrangentes sobre o seu comportamento frente as diferentes solicitações e condições de campo. Como o desenvolvimento da resistência depende principalmente das proporções de cada material utilizado, é necessário realizar uma exploração aprofundada das diferentes proporções e ter uma melhor compreensão de como cada componente da reação contribui para a resistência. Além disso o comportamento dos materiais álcali ativados ao longo do tempo em termos de durabilidade e vida de fadiga também necessita de um melhor entendimento.

Nesse sentido, o presente trabalho busca obter uma solução viável do ponto de vista de engenharia através do estudo do comportamento mecânico da álcali ativação da cinza volante para fins de estabilização de RAP, visando proporcionar economia e sustentabilidade. Para isso, ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, durabilidade e módulo de resiliência serão executados buscando-se verificar o desempenho das proporções de RAP, agregados virgens e solução ativadora na composição da mistura.

Portanto, este trabalho teve como objetivo geral avaliar o uso de geopolímero em cimentação de material fresado para bases em restauração profunda. Para que isso possa ser atingido, propõem-se alguns objetivos específicos:

- Dosar um geopolímero direcionado para a cimentação de material fresado;
- Avaliar as propriedades mecânicas da cimentação de material fresado com geopolímero;
- Verificar o comportamento do material sob carregamentos cíclicos;

- Avaliar a durabilidade das cimentações realizadas em restauração profunda de pavimentos.

Por fim, esta tese apresenta, além deste capítulo introdutório, capítulos teóricos que dissertam sobre os seguintes aspectos: Geopolímero e Restauração de Pavimentos. O capítulo 3 propõe os aspectos metodológicos norteadores da pesquisa, o capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e no último capítulo são apresentadas considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS ÁLCALI ATIVADOS

2.1.1. Definição

O termo genérico geopolímero refere-se a um produto policondensado, originado de uma reação específica entre um aluminossilicato sólido e uma solução aquosa de um silicato e/ou um hidróxido alcalino (DAVIDOVITS, 1991). Esse termo foi introduzido por Davidovits (1979) para caracterizar polímeros minerais resultantes da geoquímica. O prefixo “geo” termo é utilizado devido este material ser constituído, em sua maior parte, por óxidos de alumínio e de silício, os quais são os principais componentes da crosta terrestre. Já o sufixo “polímero” refere-se ao processo de polimerização ocorrida durante a sua síntese (BUCHWALD *et al.*, 2005; DAVIDOVITS, 2011). Vários outros nomes, tais como: cimento alcalino, geocimento, polímero inorgânico ou ainda materiais álcali ativados são utilizados para definir os materiais produzidos pela reação entre um mineral aluminossilicato (precursor) e uma solução alcalina. Duxon *et al.* (2007) caracteriza essas variações de nomenclaturas como marcas comerciais diferentes para o mesmo produto.

Ainda existem discordâncias quanto a terminologia mais adequada para o produto da reação entre um ativador alcalino e uma fonte de aluminossilicato, fazendo com que alguns autores utilizem as duas terminologias indistintamente. No presente trabalho serão utilizadas as nomenclaturas álcali ativação e materiais álcali ativados para essa reação e o produto gerado respectivamente.

Os primeiros modelos teóricos de materiais álcali ativados foram desenvolvidos por Glukhovskiy (1959). O trabalho de Pacheco-Torgal *et al.* (2008a) apresenta um histórico sobre a tecnologia desses materiais, identificando que além do primeiro modelo teórico, Glukhovskiy (1959) foi também o primeiro autor a estudar os cimentos alcalinos. O modelo mais simplificado para a estrutura dos materiais álcali ativados é representado por tetraedros compostos de quatro átomos de oxigênio (O) ligados com um átomo de Si ou Al, compartilhando entre si os átomos de oxigênio e formando estruturas poliméricas.

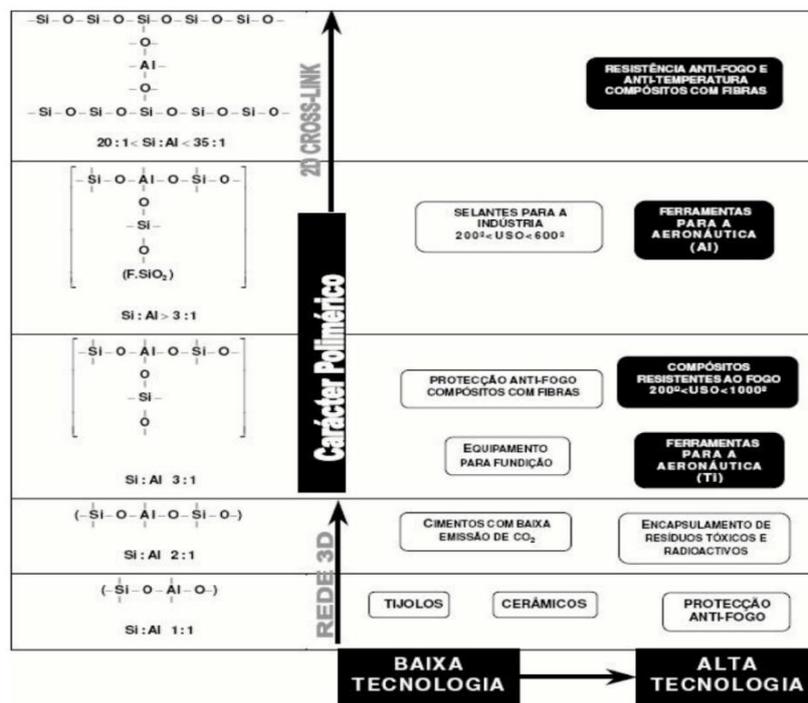
O produto gerado no processo de álcali ativação geralmente apresenta: rápido desenvolvimento de resistência mecânica, resistência ao fogo, excelente aderência, baixa condutividade térmica, alta resistência mecânica, resistência a ataques ácidos, baixa fissuração e o tempo de pega que pode ser controlado de acordo com o tipo de matéria prima utilizada e

as condições de processamento (DUXSON e FERNANDEZ-JIMENEZ *et al.*, 2007), podendo atingir resistências superiores a 50 MPa em 4 horas (DAVIDOVITS e SAWYER, 1985).

2.1.2. Classificação

Davidovits *et al.* (1994) estabeleceram uma classificação para os materiais álcali ativados baseados na relação entre silício e alumínio (Si/Al). As relações Si/Al podem ser de 1, 2 e 3, recebendo as terminologias: polissialato, polissialatossiloxo e polissialatodisiloxo, respectivamente. Além das nomenclaturas, pode-se ainda definir algumas aplicações para os materiais álcali ativados baseado na relação Si/Al que são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Aplicações dos materiais álcali ativados para diferentes relações Si/Al

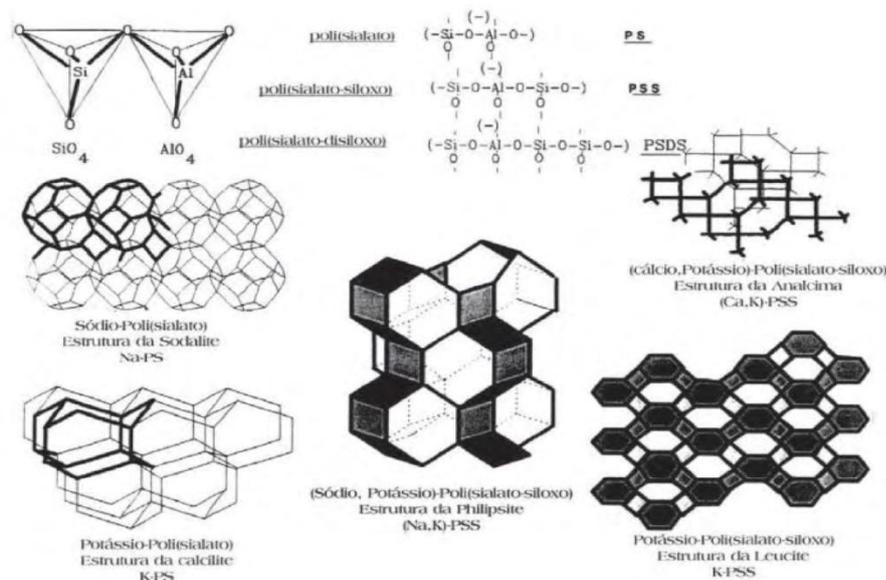


Fonte: (CORREIA, 2011).

A composição química dos materiais álcali ativados é semelhante ao das zeólitas, porém apresentam uma microestrutura semicristalina diferente da estrutura extremamente cristalina das zeólitas, sendo também essa semelhança geoquímica que dá origem para o nome (DAVIDOVITS, 1994). As zeólitas são silicatos e aluminosilicatos naturais, unidos através de átomos de oxigênio em redes tridimensionais cristalinas, contendo canais e cavidades de dimensões moleculares (CORMA, 2003).

Quimicamente os materiais álcali ativados baseados em aluminosilicatos foram nomeados de poli(sialato), consistindo em uma rede de silicatos ($[\text{SiO}_4]^{4-}$) e aluminatos ($[\text{AlO}_4]^-$), geralmente ligadas com cálcio (Ca^{2+}), sódio (Na^+) ou potássio (K^+) onde os átomos de oxigênio são compartilhados. Os $[\text{AlO}_4]^-$ necessitam de cátions do tipo Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ para balancear as cargas e gerar uma estrutura eletricamente neutra, pois quando unido com os átomos de oxigênio o Al assume forte carga negativa (Davidovits, 1991). A Figura 2 apresenta um esquema da organização e algumas estruturas químicas apresentadas pelos materiais álcali ativados.

Figura 2 - Organização e estrutura química dos materiais álcali ativados



Fonte: Adaptado de Davidovits (1991).

2.1.3. Caracterização

O processo de álcali ativação pode ocorrer de duas formas e variar de acordo com o tipo de material utilizado como matéria prima. Na presença de silício e cálcio, a reação em meio alcalino acontece principalmente com formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). No caso de existir silício e alumínio, a reação gera uma cadeia polimérica de aluminosilicatos (PALOMO *et al.*, 1999).

Para caracterização da microestrutura dos materiais álcali ativados, inicialmente Davidovits (1991) utilizou análises de difratometria de raios X (DRX), espectroscopia de alta resolução por ressonância magnética nuclear (NMR), utilizando técnicas de rotação da amostra

em torno do ângulo mágico (MAS). Posteriormente, trabalhos como o de Xu e Van Deventer (2002), usaram técnicas como: microscópio eletrônico de varredura (MEV), espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS), e microscópio eletrônico de transmissão (MET). Especificamente com o intuito de verificar as mudanças que ocorrem durante algum tratamento térmico que o material possa ser submetido antes e depois da álcali ativação, Lee e Van Deventer (2002) indicaram a Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) como sendo mais eficaz do que a DRX. Pequenos desvios na evolução estrutural do material podem ser identificados apenas com o emprego da FTIR.

Outras técnicas de caracterização utilizadas em materiais álcali ativados que permitem a avaliação das suas propriedades são a densidade e porosidade do material, identificando que o aumento da densidade e da resistência mecânica são diretamente proporcionais (GAO *et al.*, 2013).

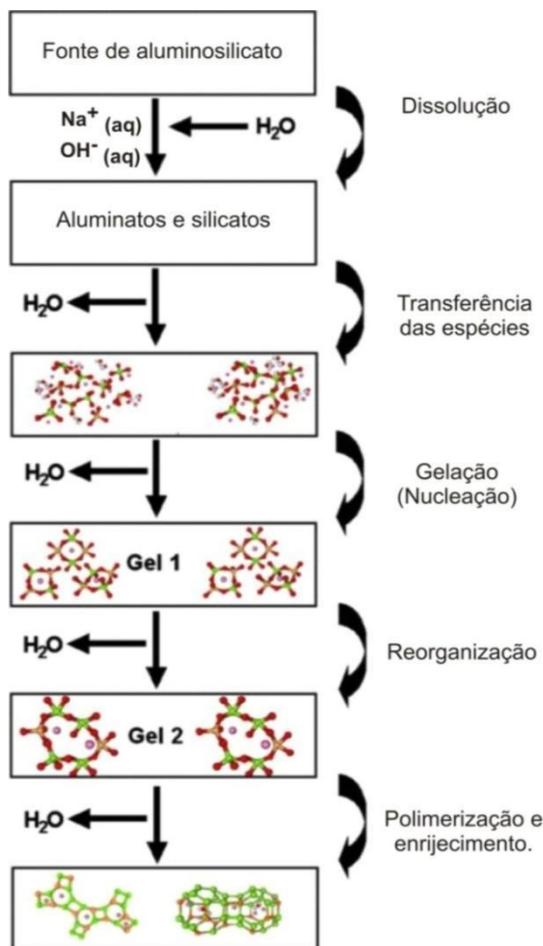
As patentes mais importantes relacionadas a produção e caracterização de materiais álcali ativados são as registradas por Davidovits, entre elas: métodos para produção de geopolímero (DAVIDOVITS, 1982; DAVIDOVITS, 1984; DAVIDOVITS *et al.*, 1994), geopolímero de alta resistência inicial (DAVIDOVITS e SAWYER, 1985), método para obter geopolímero capaz de estabilizar materiais radioativos (DAVIDOVITS, 1994), etc.

2.1.4. Mecanismos de ativação

O processo de ativação alcalina trata-se de uma geosíntese, uma reação que une quimicamente minerais e que acontece naturalmente em ambiente alcalino para silicoaluminatos (HERMANN *et al.*, 1999). Segundo Xu, Hua e Van Deventer (2000), qualquer composto pozolânico ou fonte de sílica e alumina está apto a se dissolver em uma solução alcalina e ser utilizada como possível matéria prima para a álcali ativação. Trata-se de uma reação exotérmica que compreende quatro fases: a primeira onde os reagentes são dissolvidos, a segunda na qual há transferência das espécies dissolvidas da superfície dos sólidos para uma fase de gel, a terceira fase durante a qual ocorre a nucleação e, a última, onde ocorre a policondensação da fase de gel (XU; VAN DEVENTER, 2003). Ressalta-se que as reações não ocorrem de maneira linear como mostrado na Figura 3, e que o tipo de tratamento que a matéria prima sofre antes da produção do geopolímero (grau de moagem e tratamento térmico) é muito influente nas características do produto final. No caso de materiais álcali ativados confeccionado com metacaulim, a redução no tamanho das partículas gerou aumentos na resistência à compressão de até 35%. Amostras com superfície específica de 15 m²/g

promoveram resistências de 55 MPa, sendo que amostras com superfície específica de 25 m²/g geraram resistências próximas de 75 MPa (WENG *et al.*, 2005).

Figura 3- Modelo conceitual da reação de álcali ativação



Fonte: Adaptado de Duxson *et al.* (2007)

Segundo Davidovits (1982), para que a álcali ativação ocorra, a proporção entre os vários compostos presentes na combinação de ambos os produtos, tanto do material base, como da solução ativadora, deve estar dentro de alguns limites apresentados na Tabela 1.

Barbosa *et al.* (2000) avaliaram os valores propostos por Davidovits (1982) utilizando metacaulim, hidróxido de sódio e silicato de sódio e obtiveram o melhor desempenho mecânico para as relações: $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2=0,25$; $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=10$ e $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=3,3$. Os resultados encontrados são próximos dos observados por Davidovits (1982), porém fora dos limites inicialmente propostos. Se tratando de relação molar Si/Al, Davidovits (2008) definiu que os valores ideais ficam entre 2,05 e 2,57. Para Duxson *et al.* (2005), o valor da relação molar Si/Al ideal é de 1,9.

Tabela 1– Razões molares ideais entre os reagentes da mistura para álcali ativação

Razão molar entre os compostos reagente da mistura	
$(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})/\text{SiO}_2$	0,2 a 0,28
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	3,5 a 4,5
$\text{H}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})$	15 a 17,5
$(\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$	0,8 a 1,2

Fonte: (Davidovits, 1982).

2.1.5. Precursores

Os materiais álcali ativados são gerados pela polimerização de alumina e sílica em soluções alcalinas. Dessa forma, qualquer material que tenha potencial de dissolver alumina e sílica facilmente em meio à ambientes com alto pH tem o potencial de ser empregue como precursor na produção de ligantes álcali-ativados (MOGH DAM *et al.*, 2019). Devido à essas características, materiais aluminossilicatos e resíduos industriais denotam grande potencial de utilização, sendo os mais utilizados: caulim (DAVIDOVITS, 1991; XU e VAN DEVENTER, 2003; BARBOSA *et al.*, 2000) e pozolanas (BONDAR *et al.*, 2005); metacaulim proveniente da indústria de papel (SANTA, 2012), cinza volante (HARDJITO e RANGAN, 2005; PALOMO *et al.*, 1999; DIAZ-LOYA *et al.*, 2011), cinza pesada (BLISSARI *et al.*, 2011; CHINDAPRASIRT *et al.*, 2009) e escória de alto-forno combinada com cinza volante (SABITHA *et al.*, 2012; ISMAIL *et al.*, 2014).

No entanto, apesar da grande disponibilidade de materiais aluminossilicatos, fatores como o custo, demanda específica e tipo de aplicação do produto final, são preponderantes para designar se o material pode ser utilizado como precursor (WALLAH e RANGAN, 2006).

Além disso, os materiais precursores são caracterizados por serem estruturalmente desordenados, ou seja, amorfos, e podem apresentar especificidades vítreas, como nas cinzas volantes e escórias de alto forno, ou podem exibir estruturas em camadas geradas por tratamentos térmicos, como no caso do metacaulim (PROVIS *et al.*, 2015).

Embora as características macroscópicas de geopolímeros produzidos com aluminossilicatos distintos podem apresentar similaridades, a sua microestrutura e propriedades físicas, químicas, mecânicas e térmicas diferenciam-se em função da matéria-prima utilizada (DUXSON *et al.*, 2007). Por exemplo, os cimentos geopoliméricos confeccionados com matérias-primas calcinadas ou tratadas termicamente (cinza volante, metacaulim ou escória de alto forno) que habitualmente apresentam propriedades mecânicas superiores, quando

comparado com os demais (YUN-MING *et al.*, 2016). Dessa forma, a ampla diversidade de precursores com diferentes composições químicas faz com que a previsão do mecanismo de álcali ativação seja mais complexa e se faça necessária uma investigação detalhada do material precursor a ser utilizado (SINGH e MIDDENDORF, 2020).

2.1.5.1. Metacaulim

O metacaulim é um material ativado termicamente, com alta atividade pozolânica e rico em alumina e sílica, obtido a partir da calcinação de argilas caulínicas em temperaturas entre 650°C à 800°C, de acordo com a pureza e cristalinidade das argilas (LI *et al.* 2010). Outra forma de obtenção do metacaulim se dá pelo tratamento de resíduos da indústria de papel, formado basicamente por um caulim beneficiado de extrema finura, branquidade e pureza (DAL MOLIN, 2005).

Como resultado do aquecimento durante sua produção, há a criação de ligações Al-O-Al altamente energéticas, o que favorece as reações com os materiais ativadores. Além do mais, a dissolução das camadas de alumínio possibilita a existência de locais de silício acessíveis para a solução alcalina, fazendo com que o metacaulim seja um precursor altamente reativo (PROVIS e BERNAL, 2014).

O metacaulim é um precursor que apresenta elevada pureza, com relação Si/Al ≈ 1 e com conteúdo de minerais contaminantes reduzidos, grande reatividade por possuir alto conteúdo de fases amorfas e maior homogeneidade se comparado com outras adições minerais empregados como precursores (LONGHI, 2018). O componente Al do metacaulim tende a dissolver-se com maior facilidade que o Si e frisam que o elemento Al desempenha um papel imprescindível na regulação do tempo de pega dos materiais álcali ativados (SILVA *et al.*, 2007).

Uma das desvantagens do processo de álcali ativação do metacaulim em larga escala, é a grande área superficial da partícula, normalmente em formato de floco (PROVIS e VAN DEVENTER, 2009). Em virtude deste formato, a quantidade de água necessária para que ocorra a reação do metacaulim é muito grande, acarretando problemas devido à retração da pasta por secagem, podendo levar a rupturas. Complementarmente a isso, o uso excessivo de qualquer solução alcalina pode fomentar a formação de eflorescências, que são predominantes em materiais álcali ativados de metacaulim em comparação aos de cinza volante, em consequência da maior quantidade de sais solúveis neste material (PROVIS e VAN DEVENTER, 2009).

Esse precursor pode apresentar ainda diversos graus de finura, superfície específica e discrepância na coloração. Estas características dependem da composição química e mineralógica do caulim base (VASSALO, 2013; ROCHA e VASCONCELOS, 2006).

Contudo, ainda hoje o metacaulim é o precursor mais utilizado por pesquisadores, graças a sua alta taxa de dissolução em meio alcalino e à simplicidade no que diz respeito ao controle da relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (CESARI, 2015). Os materiais álcali ativados produzidos com metacaulim são vistos como sistema modelo, não envolvendo a complexidade dos subprodutos industriais, que podem vir a ter variações em função da forma de obtenção e possíveis contaminações (PIRES, 2015).

2.1.5.2. Cinza Volante

As cinzas volantes são subprodutos obtidos na geração de energia elétrica, a partir do carvão mineral, em usinas termelétricas. Como possuem propriedades pozolânicas, são adquiridas pelas indústrias cimenteiras e concreteiras. Entretanto, estas não conseguem absorver toda a cinza gerada, havendo sérios problemas ambientais e econômicos quanto a sua disposição. Como exemplo, cita-se a termelétrica Presidente Médice, localizada na cidade de Candiota – RS, na qual apenas 15% das CV geradas são comercializadas. O excedente é disposto no meio ambiente como material de aterro nas áreas de extração do carvão mineral (VARGAS *et al.*, 2007)

Dessa forma, a utilização de cinzas volantes para a produção dos ligantes álcali ativados tem sido investigada por vários pesquisadores devido à sua grande produção e sua pouca utilização, tornando-se um problema de armazenamento (AZEVEDO *et al.*, 2017).

Quimicamente a cinza volante é composta principalmente de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO (SUN *et al.*, 2022), sendo os três primeiros os óxidos ácidos que reagem com os álcalis do ativador (XIE e XI, 2001). No entanto a composição química varia substancialmente dependendo das impurezas no carvão (FERNÁNDEZ JIMÉNEZ, 2000). Além disso a cinza volante contém diferentes tamanhos de partículas esféricas heterogêneas (FERNÁNDEZ JIMÉNEZ, 2003). O formato das partículas da cinza volante apresenta uma série de vantagens, tais como: redução da demanda de água pelo efeito de laminação e redução da porosidade pela maximização do empacotamento das partículas.

A cinza volante pode ainda ser classificada em duas categorias de acordo com o teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$. Geralmente, as cinzas volantes com teor de $50\% < \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 < 70\%$ são classificadas como cinzas de alto teor de cálcio (FERNÁNDEZ JIMÉNEZ e PALOMO, 2005; HOOTON *et al.*, 1996), e raramente são utilizadas como precursor devido às propriedades de pega muito rápidas (ASTM, 2003). Já as cinzas volantes com teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ maior que 70% são definidas como do tipo de baixo teor de cálcio, possuindo alto teor de fases alumina-silicato amorfas (PROVIS, 2009).

Estudos avaliando as propriedades de materiais álcali ativados de cinza volante identificaram que os mesmos são caracterizados por um lento desenvolvimento da resistência à temperatura ambiente (THOMAS *et al.*, 2016; FANG *et al.*, 2020; CHANG, 2003; DURAN *et al.*, 2009; NEDELJKOVIC *et al.*, 2018; SUN *et al.*, 2022b)

As propriedades de sistemas álcali ativados de cinzas volantes são principalmente controladas pela disponibilidade de Al (normalmente entre 21,8% - 34,5%) (DUXON *et al.*, 2007; FERNÁNDEZ JIMÉNEZ *et al.*, 2006; WENG *et al.*, 2005). Sem Al reativo suficiente, os produtos da reação podem ser instáveis quando expostos à umidade, mesmo que o desenvolvimento de resistência seja aceitável. Além disso, um alto teor de perda ao fogo pode levar a alta demanda de água e baixa resistência, uma vez que aumentando o teor de carbono se reduz a atividade pozolânica (SUN *et al.*, 2022a).

A finura da cinza volante também é um fator crítico para o desenvolvimento de resistência de materiais álcali ativados por cinza volante (DIAZ-LOYA *et al.*, 2011; RICHARD *et al.*, 2011), melhorando drasticamente quando o tamanho médio de partícula de cinza volante é inferior a 45 µm (FERNÁNDEZ JIMÉNEZ e PALOMO, 2005).

2.1.5.3. Ativadores

A formação e estabilização de uma nova estrutura que ocorre durante o processo de álcali ativação, só é possível em um meio fortemente alcalino que tenha a capacidade de dissolver determinada quantidade de sílica e alumina e hidrolisar a superfície das partículas da matéria prima (SEVERO *et al.*, 2013).

Nesse sentido, a concentração do ativador alcalino é o fator mais importante do processo de álcali ativação. Um aumento na concentração do ativador acarreta também, no aumento da velocidade de reação, formando um material menos poroso e mais resistente. Todavia, existe uma concentração limite, na qual o excesso de hidroxilas provoca a precipitação do gel prematuramente, resultando em um material álcali ativado com menor resistência (EDUOK, 2016). Autores como Pinto (2004), Wang *et al.* (2005) obtiveram resultados melhores na ativação alcalina do metacaulim quando aumentaram a concentração de hidróxido de sódio de 4 mol/litro para 12/mol/litro, obtendo resistência a flexão de 15 MPa e 50 MPa respectivamente.

Os materiais ativadores necessitam de um componente alcalino na forma aquosa. Desta forma os materiais ativadores mais utilizados são os hidróxidos de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH), quando considerados simples e quando considerados compostos, a base

alcalina é combinada com silicato de sódio (Na_2SiO_3) ou silicato de potássio (K_2SiO_3) (PROVIS e BERNAL, 2014). Segundo Cassel (2018), o NaOH é o hidróxido ativador mais empregado na sintetização de materiais álcali ativados em razão da sua larga acessibilidade, baixo custo e disponibilidade quando comparado a outros hidróxidos. No entanto, se trata de um material altamente corrosivo, havendo a necessidade de se ter equipamentos especiais para o seu processamento em larga escala. Por este motivo, em alguns casos, é mais aconselhável realizar a ativação de materiais álcali ativados por meio de silicatos.

Os ativadores alcalinos possuem um papel imprescindível para a reação de álcali ativação, sendo que este processo se desenvolve com maior velocidade quando o ativador apresenta silicatos solúveis em vez de somente hidróxidos alcalinos. Quando utilizado o silicato integrado ao hidróxido, a álcali ativação é favorecida e há a obtenção de um produto com maior teor de Si e maior resistência (TORGAL e JALALI, 2009). A utilização de silicato de sódio influencia diretamente a trabalhabilidade e o tempo de pega do material formado, modificando a sua composição e microestrutura (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2015b; NADOUSHAN e RAMEZANIANPOUR, 2016).

De acordo com Nadoushan e Ramezianpour (2016), a introdução de silicato de sódio na solução ativadora intensifica a taxa de dissolução do material precursor, antecipando o processo de polimerização. Isto acontece devido a disponibilização de silício (Si) ao sistema desde o início, dado que no processo de hidrólise primeiramente ocorre a dissolução do alumínio (Al) e posteriormente a liberação de Si. Ademais, o silicato de sódio melhora a interface entre o gel e as partículas do material precursor que não foram dissolvidas por completo. Tais fatores ampliam o grau de polimerização, melhorando as propriedades mecânicas do material (ROBAYO- SALAZAR *et al.*, 2017).

A alta liberação de calor, associada à dissolução dos hidróxidos, pode proporcionar tensões térmicas prejudiciais durante a álcali ativação (PROVIS e VAN DEVENTER, 2014), portanto segundo Alvarenga (2018), utiliza-se o processo chamado “two-part-mixing”, onde a solução é previamente preparada e apenas quando se perde o calor da mistura é feita junção com os precursores.

Por fim, busca-se ainda de ativadores alternativos que corroborem com o desenvolvimento de produtos ambientalmente e economicamente viáveis. Trabalhos como o de Passuelo *et al.* (2017) e Torres-Carrasco *et al.* (2015) utilizaram resíduos como fontes alternativas de ativadores e obtiveram bons resultados que superaram o desempenho do cimento Portland.

2.1.6. Cura

A cura está associada à todas as etapas do processo de álcali ativação e por consequência, com a porosidade e resistência mecânica do material álcali ativado formado. Os fatores envolvidos no procedimento de cura são umidade, temperatura e circulação de ar (XU, 2002; KHALE e CHAUDHARY, 2007). Segundo Görhan e Kürklü (2014), a cura dos materiais álcali ativados pode ocorrer em temperatura ambiente, contudo o processo de álcali ativação se torna lento, limitando o desenvolvimento de resistência do material.

A cura térmica contribui com a remoção de água, gerando nanoporos descontínuos na matriz e potencializando o comportamento mecânico do material (KONG e SANJAYAN, 2010), uma vez que a água existente na mistura atua como meio para que a hidrólise do precursor seja realizada. Após essa fase é necessário remover a água, para que ocorra o desenvolvimento da resistência do material álcali ativado.

Outro fator importante da cura térmica nos materiais álcali ativados é a tendência de minimizar a formação de eflorescência na superfície. Tal comportamento é justificado pela ampliação do grau de polimerização da matriz acrescido da interferência na cinética das reações (TEMUJIN *et al.*, 2009).

O aumento da temperatura de cura é considerado significativo principalmente na resistência mecânica para as primeiras idades de ruptura (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 1999). Outros trabalhos também relatam que, dependendo do tipo de ativador, tanto o aumento da temperatura quanto do tempo de cura tem influência nas propriedades mecânicas (WANG *et al.*, 1994).

Um estudo com materiais álcali ativados à base de metacaulim concluiu que a temperatura ideal para a cura dos mesmos é de 60°C e que temperaturas superiores a esta mostraram-se prejudiciais ao passar do tempo, em virtude do aumento da porosidade e diminuição da resistência à compressão. Tal estudo foi elaborado com uma cura térmica inicial de 40°C por 2h e uma segunda cura de 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 75°C e 90°C por 24h (MUÑIZ-VILLARREAL *et al.*, 2011). Nesse contexto, Kirschner e Harmuth (2004) avaliaram a álcali ativação de metacaulim com hidróxido de sódio e silicato de sódio e obtiveram o melhor desempenho mecânico com 4 horas de cura a 75° C. Os autores afirmam também que a cura realizada imersa em água resultou na redução da resistência do material.

Mo *et al.* (2014) também investigaram os efeitos da temperatura na resistência à compressão de materiais álcali ativados, obtendo bons resultados a partir do aumento da temperatura de cura. Este comportamento foi verificado até a temperatura de 60°C, já que em

temperaturas superiores notou-se um decréscimo na resistência, configurando efeitos negativos aos corpos de prova. Os autores estimam que ao atingir temperaturas de 80°C e 100°C, a cura térmica pode ter ocasionado desidratação e retração excessiva no material álcali ativado, promovendo a redução da resistência das amostras quando equiparado aos valores obtidos com a temperatura de 60°C.

A cura à temperatura ambiente, temperaturas de cura muito altas ou ainda elevados tempos de cura térmica não são benéficos para o desempenho mecânico de materiais álcali ativados. Existe, portanto, uma condição considerada ideal de tempo e temperatura de cura, para que fissuras originadas de evaporação da água ou retração do material não reduzam as resistências mecânicas desses materiais (VAN JAARSVELD *et al.*, 2002).

Pinto (2004) recomenda ainda que as amostras sejam protegidas para prevenir a evaporação de água. A proteção dos corpos de prova com algum tipo de isolamento se faz necessária antes, durante e depois da cura, pois para alguns tempos e temperaturas, pode ocorrer a queda de pH e o processo de carbonatação (CRIADO *et al.*, 2005).

2.2. RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS

De acordo com pesquisa da Confederação Nacional de Transportes (CNT) (2021), em uma extensão de mais de 109.103 km de rodovias no Brasil, 61,8% das rodovias apresentam algum problema relacionado às características do pavimento, sinalização ou geometria da via. A avaliação do item condição do pavimento aponta 52,2% das rodovias com problemas, sendo 33,2% considerados em ótimo estado; 14,6%, bom; 30,6%, regular; 15,8%, ruim; e 5,8%, péssimo. O Plano CNT de Transporte e Logística (2018) estima que seja necessário um investimento no valor de R\$ 496,1 bilhões em 981 projetos para a infraestrutura rodoviária, incluindo intervenções de construção, pavimentação, duplicação, recuperação e demais adequações. Dessa forma, para a melhoria da malha rodoviária brasileira são necessárias intervenções de restauração e reabilitação dos pavimentos.

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006), define como restauração de pavimentos as atividades necessárias para recuperar os atributos funcionais e estruturais do pavimento, através de intervenções físicas na rodovia que são intituladas de Restauração e/ou Reabilitação de pavimentos. O processo de restauração tem início com a definição do problema através da coleta e avaliação de dados, bem como a identificação das restrições. Verificando-se a viabilidade técnica e econômica das opções, normalmente encontram-se mais de uma solução para a mesma malha viária (DNIT, 2016).

Das várias técnicas disponíveis para restauração de pavimentos, todas devem permitir a recuperação da serventia do trecho. O termo serventia surgiu em 1993 no Manual da AASHTO (Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários de Transporte), e significa o atendimento das necessidades do usuário, levando-se em consideração os vários fatores intervenientes. Para que isso se torne possível, a técnica aplicada deve restabelecer o desempenho funcional e estrutural. Em pavimentos flexíveis, por exemplo, o tipo de defeito encontrado conjuntamente com ensaios complementares indica a possível falência das várias camadas que compõe o pavimento. Todos esses dados permitem elencar as medidas mais apropriadas (DNIT, 2006).

Dentre as várias possibilidades de restauração para pavimentos, a reciclagem com estabilização de material proporciona um comportamento da estrutura de pavimento menos flexível, diminuindo as deformações e permitindo projetos para fluxo e cargas maiores (PCA, 2005).

2.2.1. Reciclagem de misturas asfálticas

Em obras de infraestrutura, normalmente objetiva-se reduzir custos de construção, aproveitar os materiais existentes, preservar a geometria existente, preservar o meio ambiente, economizar energia e diminuir o tempo de obra. Neste contexto, a reciclagem é atualmente a técnica recomendada pelo DNIT para pavimentos flexíveis no Brasil. Recentemente foi ainda aprovada a Resolução N° 14, de 8 de julho de 2021, que dispõe que todos os projetos de engenharia de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT devem incluir o reaproveitamento de material asfáltico fresado eventualmente produzido no empreendimento.

Art. 1º DISPOR que todos os projetos de engenharia de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, desenvolvidos no âmbito da Sede e Superintendências Regionais, deverão incluir o reaproveitamento do RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) eventualmente produzido no empreendimento.

Art. 2º O RAP deverá ser aplicado nas camadas do pavimento a serem construídas ou na execução de novos concretos asfálticos.

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), a reciclagem de pavimentos asfálticos permite a utilização das misturas asfálticas deterioradas na produção de novas misturas, normalmente necessitando de agentes ligantes para obtenção das propriedades exigidas de um pavimento. Na

Tabela 2 são apresentadas as possíveis técnicas de reciclagem de pavimentos e a sua classificação quanto aos processos envolvidos.

Tabela 2 – Classificação dos processos de reciclagem de pavimentos

Quanto à geometria original	Sem modificação	Quando se mantém as cotas do greide
	Com modificação	Quando não se mantém as cotas do greide
Quanto ao local de processamento	Em usina	Fixa ou móvel, quente ou frio
	<i>In situ</i>	
	Mista	<i>In situ</i> da reciclagem da base e aplicação de reciclagem a quente processada em usina de material fresado
Quanto a fresagem do material	A frio	Realizada a temperatura ambiente
	A quente	Realizada com pré-aquecimento do pavimento
Quanto à profundidade do corte	Superficial	Somente da camada de revestimento
	Profunda	Camada de revestimento, base e sub-base
Quanto à origem da mistura reciclada	Mistura a frio	PMF
	Mistura a quente	CBUQ, PMQ
Quanto ao uso da mistura	Como base reciclada	
	Como camada de ligação	
	Como revestimento	
Quanto aos materiais adicionados	Agregados	Correção granulométrica
	Cimento Portland e cal	Aumento da capacidade estrutural
	Emulsão especial e CAP	Rejuvenescimento
	Misturas asfálticas	Adição de material fresado

Fonte: Adaptado de Bonfim (2011).

De acordo com o manual do DNIT (2006), a reciclagem pode ser feita das seguintes formas: à quente, à frio, a quente *in situ* e à frio *in situ*. O produto gerado por cada uma delas tem de apresentar um material final que apresente características técnicas de acordo com a aplicação pretendida. Mesmo as tecnologias a frio apresentando normalmente interrupções maiores no tráfego da via, conceitos mais sofisticados podem ser alcançados como o conceito de trem completo, onde o processo integral de reciclagem é realizado em apenas uma passagem.

Para este tipo de reciclagem são necessários aditivos estabilizadores, sendo os agentes estabilizadores mais comuns o cimento ou cal. Além disso, o processo de reciclagem a frio in situ permite que além da camada de rolamento, as camadas de base e sub-base possam ser aproveitadas. Todas elas juntas, corrigidas e estabilizadas geram uma base mais rígida para receber camadas de rolamento convencionais (WIRTGEN, 2012).

O processo de fresagem é uma técnica constantemente aplicada como parte do processo de restauração de pavimentos com problemas funcionais e/ou estruturais.

2.2.2. Fresagem

A fresagem de pavimentos é definida como o corte ou desgaste de uma ou mais camadas do pavimento, com espessura pré-determinada, por meio de processo mecânico realizado a quente ou a frio (BONFIM, 2011). Usualmente essa técnica pode ser classificada em três categorias de acordo com a espessura de corte: superficial, rasa ou profunda.

A fresagem superficial é destinada apenas à correção de defeitos existentes na superfície do pavimento, podendo ser dispensado o posterior recapeamento da pista, visto que a textura final garante rolamento de forma segura. Já a fresagem rasa atinge as camadas superiores do pavimento, normalmente esse tipo de intervenção tem uma profundidade da ordem de 5 cm. Quando a operação atinge as camadas de ligação, base e até sub-base é denominada de fresagem profunda, esta operação já visa o aspecto estrutural (BONFIM, 2011).

Independentemente da espessura do corte, a fresagem de pavimentos asfálticos permite a obtenção dos agregados com certo nível de ligante envelhecido na forma de agregado, podendo facilmente serem aplicadas técnicas de reciclagem. Em todos os casos o tipo de máquina utilizada, a temperatura de extração, o sentido de atuação do cilindro fresador conjunto de equipamentos e processos adicionais alteram significativamente as características do material obtido (BALBO, 2007; BONFIM, 2011). A granulometria do material fresado pode ainda ser influenciada pela composição e constância do material original, estado de conservação da camada, temperatura do asfalto no momento da fresagem, profundidade de fresagem, velocidade da fresadora e de rotação do tambor, tipo de tambor, conservação da ferramenta de fresagem e sentido do corte (WIRTGEN, 2012).

Normalmente o material fresado necessita de correções granulométricas com material virgem para que possa enquadrar-se nas curvas recomendadas para dosagem de misturas asfálticas. O fresado pode ser considerado material nobre de excelente qualidade e utilizado para construção de camadas de rolamento, atuando como material inativo. Existindo a

necessidade de aumento da capacidade de suporte do pavimento, o material fresado reciclado pode ser adicionado como bases estabilizadas.

De acordo com o tipo de agente estabilizador, as reciclagens podem ser realizadas sem tratamento do material fresado, esse tipo de situação normalmente é empregado para bases e requer 30% de material virgem. Já o material reciclado tratado com cimento é utilizado quando o objetivo é criar uma camada semirrígida de base, mesmo que o fresado normalmente seja um material de ótima qualidade e que teoricamente apresenta usos mais nobres. Existem também os materiais reciclados tratados com emulsão betuminosa, onde a quantidade de ligante recuperada e a quantidade adicionada são decisivos para o comportamento mecânico do material. A mistura pode apresentar um comportamento de base tratada ou características de material asfáltico misturado a frio. Os materiais reciclados tratados com espuma de asfalto, requerem um controle tecnológico maior e quando atendidos os requisitos de resistência ao cisalhamento e manutenção da grandeza das solicitações, apresentam-se como um ótimo substituto para bases asfálticas (WIRTGEN, 2012).

2.2.3. Reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland

A técnica de reciclagem de pavimentos com adição de cimento Portland consiste em triturar o revestimento asfáltico e demais camadas inferiores do pavimento existente e misturar esse material com cimento afim de gerar uma nova base estabilizada através da compactação da mistura (PCA, 2010; FHWA, 1997). O cimento tem a função de ligar e agregar as partículas do material reciclado, sendo o grau de cimentação responsável pelo ganho de resistência e, conseqüentemente, pelo acréscimo de rigidez na mistura (PCA, 2010). Quantitativamente Fedrigo (2020) relata que o teor de cimento varia de 2-6% em relação ao peso de agregados totais e a quantidade de RAP varia de acordo com a espessura da camada de revestimento, sendo tipicamente inferior a 50% do total de agregados. Teores de RAP superiores a 50% apresentam um comportamento menos homogêneo, mais suscetíveis a variação de temperatura e carregamento (PCA, 2005; DNIT, 2013; KOLIAS, 1996; DELLABIANCA, 2004).

A água utilizada na reciclagem de pavimentos flexíveis apresenta duas funções: ajudar na compactação do material e hidratar o cimento Portland e, portanto, deve ser limpa e isenta de substâncias nocivas (PCA, 2010; DNIT, 2013). Se tratando de quantidades, a umidade é um fator determinante para o teor de cimento utilizado, porém, não tão importante quanto o grau e controle da compactação obtido com as misturas (FEDRIGO, 2015; CASTAÑEDA LÓPEZ, 2016; KLEINERT, 2016). Geralmente para definição desses parâmetros, utiliza-se o ensaio de

proctor de energia normal (DER, 2005; DNIT, 2013; PCA, 2007, WIRTGEN, 2012). Trabalhos recentes como o de Fedrigo (2015) e o Manual de Reciclagem de Pavimentos do DNIT (2013), recomendam 98% da energia modificada, visto que o acréscimo de resistência com o aumento da compactação é comparável com o acréscimo de resistência obtido com o aumento do teor de cimento.

A restauração profunda de pavimentos com cimento Portland é capaz de promover uma série de vantagens elencadas a seguir (PCA, 2005a; IECA, 2013; MINGUELA, 2011; PCA, 2005b; WIRTGEN, 2012):

- a) Geração de uma camada homogênea, estável e espessa, proporcionando melhores características mecânicas;
- b) Redução na tensão de compressão vertical no subleito e na tensão de tração horizontal na parte inferior do pavimento;
- c) Fornece uma camada estabilizada resistente à umidade e ao gelo;
- d) Recicla e melhora os materiais existentes que geralmente não possuem características técnicas adequadas;
- e) Permite a reabilitação sob trânsito, uma vez que o trânsito é normalmente permitido em uma pista, enquanto a construção ocorre em o outro;
- f) Mantém a elevação da rodovia, evitando problemas com meio-fio/sarjeta e folgas;
- g) Gera o mínimo de perturbação no tráfego durante construção porque o ciclo de construção é rápido e pequenas quantidades de volume de material são transportados para dentro ou para fora da rodovia;
- h) Permite realizar melhorias na geometria na rodovia simultaneamente com a reabilitação do pavimento;
- i) Aceitação e disponibilidade do cimento Portland. O material é bem conhecido e bem especificado pela indústria da construção;
- j) Preserva os recursos naturais reciclando materiais existentes e evita o descarte de materiais em aterros, principalmente em comparação com a remoção e substituição da camada de base;
- k) Reduz os custos de material novo, bem como com a sua produção e transporte, uma vez que reaproveita materiais de pavimentação existentes;
- l) É uma das alternativas de menor custo para a reabilitação de um pavimento, especialmente em comparação com estruturas espessas, sobreposição ou remoção e substituição. Geralmente é de 25 a 50% mais barato que o último.

Apesar das referidas vantagens, a reciclagem profunda de pavimentos com cimento Portland de uma estrutura não uniforme, tanto em relação aos materiais como espessuras, pode resultar em uma mistura reciclada heterogênea. Além disso, por ser uma técnica de via única, exige precauções adequadas para evitar fissuras longitudinais (MINGUELA, 2011). Devido a retração do cimento, podem ainda surgir rachaduras na camada de revestimento, ou fratura por fadiga precoce da camada devido a geração de um material quebradiço que resulta em trincas de reflexão (PCA, 2005a; WIRTGEN, 2012).

Em relação aos aspectos econômicos, embora o custo da restauração profunda de pavimentos com cimento Portland seja geralmente mais barato do que o de outras técnicas de reabilitação, estudos recentes considerando o ciclo de vida mostram que a técnica pode se tornar mais cara (BRAHAM, 2016).

Se tratando dos aspectos ambientais, a técnica diminui a emissão de dióxido de carbono e os impactos nas áreas adjacentes (erosão, poeira, etc.) devido ao transporte reduzido de materiais. Mas ainda é considerada uma fonte significativa de emissão de carbono e necessita de estudos que busquem desenvolver de ligantes cimentícios alternativos como por exemplo materiais álcali ativados produzidos a partir de resíduos e subprodutos industriais (JALLU *et al.*, 2020; SARIDE e JALLU, 2020).

2.2.4. Estabilização de solos

O solo pode ser considerado o material de engenharia mais antigo utilizado pelo homem e devido a sua disponibilidade universal apresenta uma grande variedade de utilização como material de engenharia (INGLES e METCALF, 1972). Os autores apontam três formas de utilização deste material no âmbito da engenharia: utilizar o material na sua forma *in situ*, moldando o projeto para atender as restrições impostas pelas características do solo; remover o solo e substituir por outro que atenda às necessidades de projeto; ou ainda alterar as propriedades geotécnicas existentes no solo local, criando um material capaz de atingir as exigências de projeto.

A escolha da solução mais adequada deve estar associada ao aspecto econômico, ao bom desempenho do material frente as solicitações impostas. Em muitos casos, a viabilidade da solução também deve ser considerada. Consoli *et al.* (2007) afirmam, por exemplo, que o uso de bases granulares se torna inviável quando o local de empréstimo está muito distante do canteiro de obras. Dessa forma a estabilização do solo, ou seja, a alteração das propriedades do solo, vem sendo uma alternativa de bastante interesse na engenharia civil (Neto, 2020). As

propriedades do solo podem ser alteradas por tratamento químico, térmico, mecânico entre outros (INGLES e METCALF (1972).

Yoder e Witczak (1975) afirmam, por exemplo, que se o subleito não apresenta desempenho satisfatório no seu estado natural pode ser melhorado através de misturas, como a adição de agregados, ou com uma compactação adequada. Os autores também citam que além do subleito, a estabilização do solo pode ser feita na base, sub-base e, em raras ocasiões, na superfície de rolamento do pavimento. Os requisitos necessários para que a estabilização de solo se torne viável são: permeabilidade adequada, durabilidade compatível e estabilidade volumétrica do material (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A estabilização granulométrica das camadas de bases e sub-bases granulares consiste na compactação da mistura de materiais que apresentam uma granulometria e índices geotécnicos específicos, fixados em especificações, podendo ser constituídas por solos, britas, escória de alto forno, ou ainda, pela mistura desses materiais (DNIT, 2006).

A distribuição granulométrica, a forma das partículas, a densidade relativa, o ângulo de atrito e a coesão são os fatores que influenciam na estabilidade da mistura solo-agregado (YODER E WITCZAK, 1975). A resistência ao cisalhamento, que é dependente do ângulo de atrito, tem relação com a densidade, forma das partículas e distribuição granulométrica, sendo que o ângulo de atrito deve ser alto para resistir às deformações impostas pelo carregamento. Os autores afirmam ainda que o fator mais importante é a distribuição granulométrica, especificamente a relação entre as frações finas e grossas da mistura, de forma que tanto a falta quanto o excesso de finos pode ser prejudicial ao desempenho da mistura. Destaca-se ainda a importância da resistência mecânica dos agregados utilizados na estabilização granulométrica de materiais para pavimentação, de forma que após a compactação das camadas, os agregados continuem com a mesma granulometria (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2010).

Pires (2014) avaliou o comportamento de misturas com 70% de material asfáltico e 30% de agregados virgens e identificou que a estabilização granulométrica teve crescimento potencial em relação ao material fresado estabilizado mecanicamente. O autor afirma ainda que o ISC (Índice de Suporte Califórnia) ficou três vezes maior que o fresado puro, concluindo que uma pequena quantidade de material eleva consideravelmente a capacidade de desempenho final. Posteriormente o autor utilizou ainda a estabilização química com cimento e cinza de casca de arroz (CCA), identificando que o teor de 15% de CCA já atingiu valores muito próximos à referência.

Se tratando de estabilização química, a técnica consiste na adição de materiais estabilizantes, sendo recomendada quando um material ou a combinação de materiais com

estabilidade mecânica adequada não pode ser obtida, ou onde se deseja uma melhoria na resistência do solo (INGLES E METCALF, 1972). É o método de melhoria de solo mais antigo e mais difundido (MITCHELL, 1981) e recentemente é objetivo de diversos estudos (PASCHE, 2016; CASTAÑEDA LÓPEZ, 2016; PIRES, 2014; ÁVILA, 2015; RAMOS, 2016; ROSSATO, 2013; GUSMÃO, 2008; FEDRIGO, 2015; FREIRE, 2014; NETO, 2020).

Os estabilizantes químicos mais utilizados para a melhoria das propriedades dos solos são o cimento Portland e a cal hidratada (MOH, 1965), além das cinzas volantes e materiais betuminosos (INGLES e METCALF, 1972; YODER e WITCZAK, 1975). O cimento pode ser utilizado na estabilização de camadas de base e sub-base em solos granulares, siltosos e argilosos, mas não é recomendado para solos orgânicos, pois os mesmos podem prejudicar a hidratação do cimento (YODER e WITCZAK, 1975). Já a cal é mais eficiente quando utilizada em materiais granulares e argilas, sendo necessária uma quantidade relativamente baixa para uma boa hidratação. Os autores relatam ainda que as cinzas volantes possuem teores elevados de sílica e alumina, e ferro e cálcio em menores quantidades, que se utilizadas com cal, aceleram a ação pozolânica.

Quantitativamente a resistência aumenta linearmente com o aumento do teor dos agentes cimentantes (NUNEZ, 1991). Taha *et al.* (2002) também observaram esse comportamento, tanto com a quantidade de agente cimentante quanto com a de material virgem, sendo o que o fresado sozinho não apresenta resistência suficiente para ser utilizado em base sem algum tipo de cimentação. Alguns fatores podem também retardar ou impedir a hidratação da mistura, como a presença de matéria orgânica, sulfatos e pH ácido (VENDRUSCOLO, 1996).

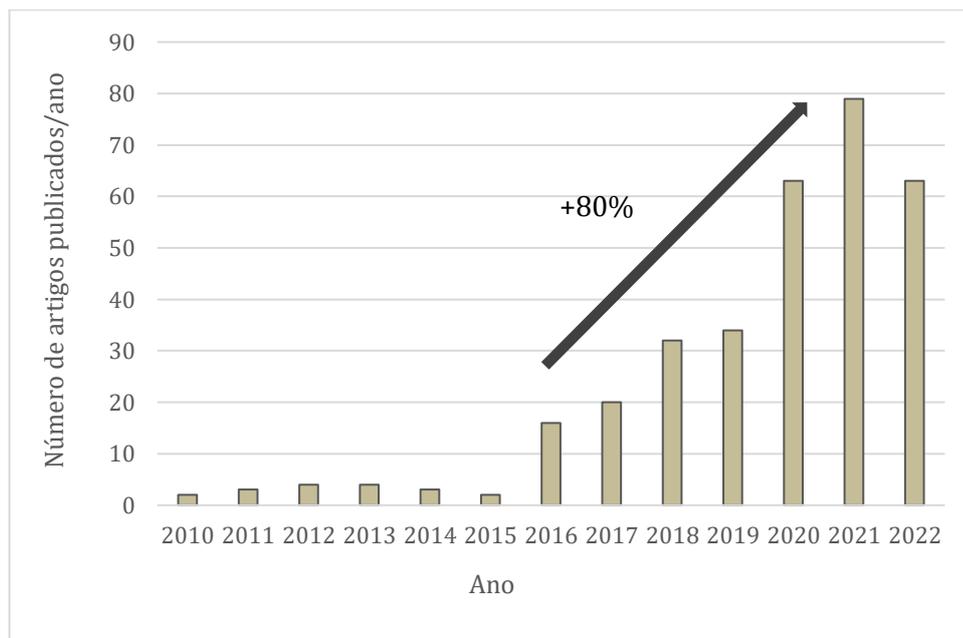
Apesar dessa relação linear entre a resistência e o teor de cimento, metodologias de dosagem e projeto de misturas solo-cimento foram desenvolvidas, correlacionando parâmetros como volume de vazios e massa específica (FOPPA, 2005; LOPES JUNIOR, 2007, 2011; CRUZ, 2008; DALLA ROSA, 2009; MARQUES, 2015). De acordo com Larnach (1960) apud Pasche (2016), a relação entre o grau de cimentação e o volume de vazios governa o comportamento de solos cimentados. Comparando com a dosagem de concreto em que se faz o uso da relação água/cimento para estimativa da resistência, a relação volume de vazios e o grau de cimentação governam a resistência dos solos cimentados. A explicação para esse comportamento, é que no caso dos solos cimentados, não é possível fazer a retirada de todo o volume de ar da mistura. Portanto, as conceituações utilizadas em concretos e argamassas não funcionam, sendo que normalmente o melhor desempenho é obtido conjuntamente com o acréscimo de material cimentante e a redução da porosidade.

2.2.5. Estabilização de material asfáltico fresado álcali ativado

A reciclagem de resíduos é de grande importância para o desenvolvimento sustentável na engenharia, o que torna os materiais álcali ativados um futuro prospectivo em aplicações de engenharia civil, como concreto permeável, engenharia geotécnica de solos, engenharia de pavimentos e obras de engenharia civil (Milad *et al.*, 2021). Nesse contexto, os pesquisadores estão mostrando cada vez mais interesse em pesquisas envolvendo materiais álcali ativados uma vez que estes são mais viáveis, baratos e ecologicamente corretos podendo substituir os agentes cimentantes na construção de estradas. Dessa forma, o uso de materiais álcali ativados leva a uma construção verde, sustentável e ecologicamente correta e que reduz a necessidade de exploração de recursos naturais (Tang *et al.*, 2019).

O interesse na publicação de pesquisas em materiais álcali ativados na área de pavimentação começou em 2003 com um número crescente de trabalhos sobre o assunto. A Figura 4 mostra as investigações sobre materiais álcali ativados na pavimentação desde 2010.

Figura 4 – Número de artigos/ano sobre materiais álcali ativados na pavimentação



Fonte: Autor (2022)

Devido à crescente demanda por práticas sustentáveis no setor de pavimentação, há uma tendência aproximadamente linear para os artigos publicados sobre materiais álcali ativados entre 2016 e 2022, com incremento de 80% nos últimos 5 anos. No presente ano, já foram publicados 63 artigos em revistas de revisão por pares, indicando uma intensiva exploração

global do uso de materiais álcali ativados no setor de pavimentação. Na Tabela 3 são apresentados alguns dos trabalhos desenvolvidos entre 2010 e 2022 que fazem uso de materiais álcali ativados produzidos a partir de cinza volante nas mais diversas áreas da pavimentação, bem como os precursores e os ativadores utilizados, o tipo de material/uso e as principais descobertas dos pesquisadores.

Tabela 3 – Estudos envolvendo aplicação de materiais álcali ativados de cinza volante em pavimentação

Autor	Precursor	Ativador	Uso/Material estabilizado	Principais descobertas
Galiano <i>et al.</i> (2010)	Caulim, metacaulim, escória moída de alto forno e cinza volante	NaOH e Na ₂ SiO ₃ /KOH e K ₂ SiO ₃	Estabilização/solidificação de cinzas de incineração de resíduos sólidos	Incremento na resistência à compressão; pH do lixiviado foi a variável mais importante na imobilização de metais
Alsafi <i>et al.</i> (2016)	Cinza volante	KOH e NaOH	Colapsabilidade do solo gipsita	O material alcali ativado de cinza volante apresentou maior resistência ao sulfato do que o cimento Portland, especialmente quando ativado com KOH; redução na colapsabilidade, lixiado e permeabilidade
Avirneni <i>et al.</i> (2016)	Cinza volante	NaOH	Estabilização de RAP com ligante álcali ativado	Os estudos de durabilidade evidenciaram que perda de massa das misturas são mínimas e consideradas adequadas para aplicações em pavimentação; o impacto do lixiviado também é mínimo; a resistência retida nas amostras atende as normativas mesmo após os ensaios de durabilidade
Ibrahim <i>et al.</i> (2016)	Cinza volante	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Asfalto Stone Mastic modificado com material álcali ativado	Aumento no módulo de resiliência; menores deformações permanentes
Hoy <i>et al.</i> (2016)	Cinza volante	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Estabilização de RAP com ligante álcali ativado	O material não apresenta riscos ambientais para uso em pavimentação; redução da lixiviação de metais pesados; aumento da resistência devido a formação de géis álcali ativados
Mohammadinia <i>et al.</i> (2016)	Cinza volante e escória granulada de alto forno	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Estabilização de tijolo triturado, agregado triturado reciclado e RAP com ligante álcali ativado	Aumento da resistência à compressão e módulo de resiliência; o agregado com maior eficiência foi o agregado triturado reciclado; melhores resultados que a estabilização com cimento.
Saride <i>et al.</i> (2016)	Cinza volante	NaOH	Estabilização de RAP com ligante álcali ativado	Aumento de até três vezes na resistência das misturas álcali ativadas; a área exposta do agregado (RAP) exerce grande influência no comportamento mecânico das misturas
Horpibulsuk <i>et al.</i> (2017)	Cinza volante	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Estabilização de RAP com ligante álcali ativado	Redução da resistência devido a formação de macro e microfissuras; não há risco ambiental para o RAP estabilizado por ligante álcali ativado; redução da lixiviação de metal pesado
Poltue <i>et al.</i> (2019)	Cinza volante e cinza de casca de arroz	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Estabilização de agregado de concreto reciclado ligante álcali ativado	Aumento da resistência para maiores relações de cinza de casca de arroz/cinza volante e de NaOH/Na ₂ SiO ₃
Atmaja <i>et al.</i> (2020)	Cinza volante	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Betume modificado por ligante álcali ativado de cinzas volantes	Melhoria das propriedades de mobilidade estrutural da cadeia e na resistência a danos causados pela umidade
Jallu <i>et al.</i> (2020)	Cinza volante	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Estabilização de RAP com ligante álcali ativado e geogrelhas	O comportamento da fadiga a flexão sob carga de tráfego pesado melhorou em relação a mistura controle; a inclusão de geogrelha aumentou a resistência à flexão
Khadka <i>et al.</i> (2020)	Metacaulim e cinza volante	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Estabilização de solos altamente expansivos com alto teor de sulfato	Controle da expansão da argila expansiva; ausência da formação de etringita

Rivera <i>et al.</i> (2020)	Cinza volante, escória granulada de alto-forno e cal	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Estabilização de solo do tipo A4	Aumento de resistência de 119,4% e 78,6% aos 7 e 28 dias de cura respectivamente; perda de massa após ciclos de molhagem e secagem atendeu as normativas
Saride e Jallu (2020)	Cinza volante	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Estabilização de RAP com ligante álcali ativado	A resistência e rigidez das misturas aumenta para maiores quantidades de ativador; as misturas com as relações Na ₂ SiO ₃ /NaOH de 50/50 e 70/30 foram consideradas adequadas como material de base de pavimento
Xiao <i>et al.</i> (2020)	Cinza volante e resíduo de pó de vidro	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Estabilização de Agregado de Resíduos de Vidro Reciclado	Redução na retração por secagem; a estabilização se mostrou eficiente melhorando as propriedades de resistência
Abdullah <i>et al.</i> (2021)	Cinza volante e escória granulada moída	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Estabilização de argila com material álcali ativado	Melhoria na resposta cíclica inicial, mas necessidade de maiores quantidades de material álcali ativado para manutenção da durabilidade
Badkul <i>et al.</i> (2021)	Cinza volante e escória granulada de alto forno	NaOH	Pavimento de concreto álcali ativado	O desempenho do concreto álcali ativado aumenta à medida que se aumenta a concentração de ativador e a quantidade de escoria; redução na espessura de projeto em comparação ao concreto convencional
Bualuang <i>et al.</i> (2021)	Cinza volante e cal hidratada	NaOH	Adição de emulsão asfáltica catiônica em material álcali-ativado	Redução da resistência mecânica; melhor flexibilidade; redução de vazios e, portanto, menor absorção de água
Girish <i>et al.</i> (2021)	Cinza volante e escória granulada de alto forno	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Concreto álcali ativado para pavimento rígido	A medida que aumenta a quantidade de escória granulada de alto forno e a concentração molar de NaOH, a resistência mecânica também aumenta, mas a consistência dificulta a moldagem
Rahman e Khattak (2021)	Cinza volante	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Concreto álcali ativado compactado com rolo	Redução na resistência à compressão, módulo e resistência à flexão em relação ao concreto compactado com rolo convencional
Suksiripattanapong <i>et al.</i> (2021)	Álcool poli vinílico e cinza volante	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Melhoramento de argila mole	Aumento da resistência a compressão em até 42%
Zahmak <i>et al.</i> (2021)	Cinza volante e escória granulada de alto forno	NaOH e Na ₂ SiO ₃	Impactos ambientais no ciclo de vida de ligantes álcali ativados para melhoria do solo	O solo estabilizado com álcali ativação superou o cimento em quatro das dez categorias de impacto avaliadas; além de ser superior em questões de distâncias de transporte e resistências à compressão
Tesanasin <i>et al.</i> (2022)	Cinza volante	NaOH	Estabilização de solo laterítico	Os resultados de resistência a compressão foram superiores aos exigidos para materiais de sub-base para as condições saturado e não saturado

Fonte: Autor (2022)

Apesar de na Tabela 3 serem apresentados apenas uma amostra de trabalhos envolvendo a álcali ativação de cinza volante na área de pavimentação, pode-se perceber que esses materiais possuem uma ampla gama de aplicações que vão desde estabilização de solos, concreto reciclado e agregados residuais da construção civil até seu uso como aditivos em ligantes da camada de revestimento. Particularmente quando se trata da estabilização de RAP, de modo a compensar a perda das propriedades mecânicas de altos níveis de substituição de agregados virgens na construção de camadas de base e sub-base de pavimentos se faz necessário o uso de estabilizadores. Esses agentes cimentantes aumentam a resistência a compressão e ao impacto, bem como a integridade geral do camadas, reduzindo a expansão, retração e abrasão (ARULRAJAH *et al.*, 2014; AVIRNENI *et al.*, 2016). Devido as grandes quantidades de materiais necessárias no setor de pavimentação, diversos pesquisadores têm estudado a estabilização de RAP a partir da incorporação de materiais residuais como cinzas volantes, escória de alto forno, cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar, entre outros (SINGH *et al.*, 2018; ADHIKARI *et al.*, 2018; CONSOLI *et al.* 2018, POLTUE *et al.*, 2019).

Apesar da grande disponibilidade desses materiais e seus benefícios em termos econômicos e ambientais, o uso de estabilizantes ricos em Ca causam retração, rachaduras e falhas no pavimento (COSTA *et al.*, 2020). Dessa forma, a álcali ativação desses materiais pode auxiliar de forma a compensar a perda de resistência na estabilização de RAP (Avirneni *et al.*, 2016). A partir do levantamento de publicações apresentados da Tabela 3 observa-se que a literatura sobre a ativação alcalina das camadas de base/sub-base do pavimento contendo RAP ainda é bastante limitada.

Hoy *et al.* (2017) avaliaram as propriedades mecânicas e o desempenho ambiental da estabilização de RAP a partir da álcali ativação. Os requisitos normativos Tailandeses foram facilmente atendidos tanto em termos de resistência mecânica como de lixiviação dos materiais. O uso de material álcali ativado eliminou a presença de alguns metais pesados, como é o caso do zinco, que estava presente nas misturas não estabilizadas. Outra investigação do trabalho de Hoy *et al.* (2017) é durabilidade das misturas ao longo do tempo. Em relação aos ciclos de molhagem e secagem, as estabilizações de material fresado com ligante álcali ativado mostraram que ocorre redução da resistência mecânica após o sexto ciclo, mas que as misturas ainda atendem aos requisitos mínimos necessários para uso em camadas de base/sub-base de pavimentação.

De acordo com a Tabela 3, a maioria das pesquisas utiliza uma combinação de NaOH e Na₂SiO₃ como ativadores. Os resultados dos estudos indicam que a relação NaOH/Na₂SiO₃ é um parâmetro que exerce considerável influência no comportamento do RAP estabilizado com

ligantes álcali ativados (ALANAZI *et al.*, 2014; HOY *et al.*, 2016; HOY *et al.*, 2017). Como o Na_2SiO_3 é o produto de maior valor agregado, as pesquisas buscam identificar o teor de Na_2SiO_3 que apresente características mecânicas adequadas e seja economicamente e ambientalmente competitivo com o cimento Portland. O uso de silicato de sódio é investigado também como uma forma de eliminar os problemas relacionados com a fissuração de materiais cimentícios. Esse produto age como um cicatrizante e pode ser utilizado encapsulado para liberação tardia apenas no momento em que ocorre a fissuração. O silicato de sódio também é utilizado para impermeabilização de concreto e, no caso da correção de fissuras, reage com os produtos da hidratação do cimento, como o hidróxido de cálcio e o carbonato de cálcio (CHANG, 2003; YANG, 2008; GILFORD, 2013; VAN TITTELBOOM, 2013; ALGHAMRI, 2016; FORMIA, 2016; RESTUCCIA, 2017).

Outro parâmetro avaliado na cimentação de RAP a partir da álcali ativação é a quantidade e molaridade do ativador. Avirmeni *et al.* (2016) apontam que a concentração de 2M de NaOH a temperatura ambiente atinge resistência de até 5,5 MPa para misturas com 4% de ativador. Esse resultado de resistência à compressão simples atende os requisitos indianos de resistência em camadas de base cimentadas. As pesquisas identificaram ainda que o teor de material álcali ativado e a resistência mecânica à compressão não apresentam uma relação linear. Hoy *et al.* (2016) indicam que existe um teor ideal de material álcali ativado a ser usado e que acima deste os acréscimos são insignificantes.

Como já mencionado anteriormente, os materiais álcali ativados apresentam melhor desempenho mecânico quando submetidos a cura térmica. No entanto, quando a aplicação desses materiais é na área de pavimentação, o processo de cura térmica é inviável. Nesse sentido Dong *et al.* (2017) avaliou a cura térmica apenas com a incidência de sol sobre as amostras com diversos tipos de tratamentos de cobertura. Os autores obtiveram um incremento de 70% na resistência à compressão com 1 dia de cura, comparando com resultado padrão de laboratório.

Além disso de forma similar a reciclagem de material fresado com cimento Portland, os estudos de reciclagem com material álcali ativado também identificaram que a interface entre o agregado e o ligante é um ponto crucial para o comportamento mecânico e de deformabilidade. Saride *et al.* (2016) realizaram uma avaliação da área disponível no material fresado para cimentação, observando um aumento de resistência mecânica à compressão simples, da ordem de 17% para um aumento na área disponível sem película de ligante asfáltico de 50%.

Por fim, de acordo com as pesquisas já realizadas, o uso de materiais álcali ativados na estabilização de RAP usando a cinza volante como precursor, se mostrou uma técnica

promissora de baixo impacto ambiental e com bom desempenho como camadas de base e sub-base de pavimentos. No entanto ainda se faz necessária a compreensão do comportamento desse material sob diversos aspectos como identificação das proporções adequadas de agregado virgens, RAP e ligante, avaliação da durabilidade e comportamento a longo prazo, avaliação do comportamento do material quando submetido a carregamentos cíclicos.

2.2.6. Comportamento mecânico de camadas cimentadas

Segundo a Wirtgen (2012), a principal função da adição de cimento em restauração profunda é o aumento da resistência à tração e compressão. Para avaliação das características mecânicas do material reciclado com cimento, faz-se uso de ensaios de resistência à compressão simples. A Portland Cement Association (2005, 2007, 2010), o Departamento de Estradas de Rodagem (2005) e DNIT (2013), estabelecem valores típicos de resistência para bases recicladas com cimento entre 2,1 MPa e 8 MPa, sendo que os valores adotados para projeto ficam próximos de 3 MPa aos 7 dias de cura. A Austroads (2002) definiu níveis de cimentação de acordo com a resistência a compressão da mistura, também relacionando este parâmetro com o módulo de resiliência utilizado para dimensionamento. O nível de cimentação deve ser adotado de acordo com o objetivo principal a ser alcançado. Valores superiores de resistência à compressão, levam a uma diminuição da fragmentação superficial, reflexão de trincas e estabilidade volumétrica do material (PCA, 2005).

Tratando-se de resistência à flexão, os valores típicos observados para o material variam de 0,25 MPa e 0,35 MPa aos 7 dias de cura. Vale ressaltar que o ensaio de resistência à compressão diametral também permite observar a qualidade da mistura de acordo com a quantidade de cimentação. Pode-se, dessa forma, avaliar visualmente indicadores de durabilidade, como misturas carbonatadas e com baixa adesão entre as partículas (WIRTGEN, 2012; DNIT, 2013).

No entanto, os benefícios gerados pela cimentação podem ser prejudicados devido a fragmentação superficial do material e a reflexão de trincas, tais problemas surgem normalmente em função da retração por secagem e ao trincamento por fadiga do material (ARANHA, 2013).

A ruptura por fadiga tem origem no acúmulo de danos em locais heterogêneos e é ocasionada pela redução dos parâmetros de rigidez (YEO *et al.*, 2011b). Nesse sentido, os pavimentos estão sob estado constante de tensões e deformações continuadas e, portanto, é evidente a importância do estudo da degradação causada pelo fenômeno de fadiga. De acordo

com Ricci (2007) as camadas de base cimentadas têm a função de uniformizar o suporte da fundação do pavimento, absorvendo as tensões de tração na flexão oriundas do tráfego dos veículos, aumentando assim, a eficiência na transferência de carga entre as diversas camadas do pavimento. Dessa forma, Back (2022) afirma que o processo de degradação por fadiga tem na resistência à tração na flexão sua principal forma de ocorrência (BACK, 2022).

A redução da rigidez é a principal consequência do acúmulo de dano nos materiais cimentados, avaliado através do módulo de elasticidade ao longo dos ciclos de carregamento (YEO E MIDGLE, 2008). Em laboratório a representação dos ensaios de fadiga se dão pela aplicação de tensões com amplitudes constantes. No entanto, de acordo com Oliveira (2000), em campo os veículos apresentam grande diversidade nos eixos, no intervalo entre carregamento e na velocidade, o que dificulta a representação em laboratório. Dessa forma existem uma série de ensaios e configurações para a simulação desses carregamentos dinâmicos: Tração Direta Uniaxial Cíclica; Flexão Dois Pontos com Base Engastada; Flexão Três Pontos; Flexão Quatro Pontos e Tração por Compressão Diametral (Tração Indireta).

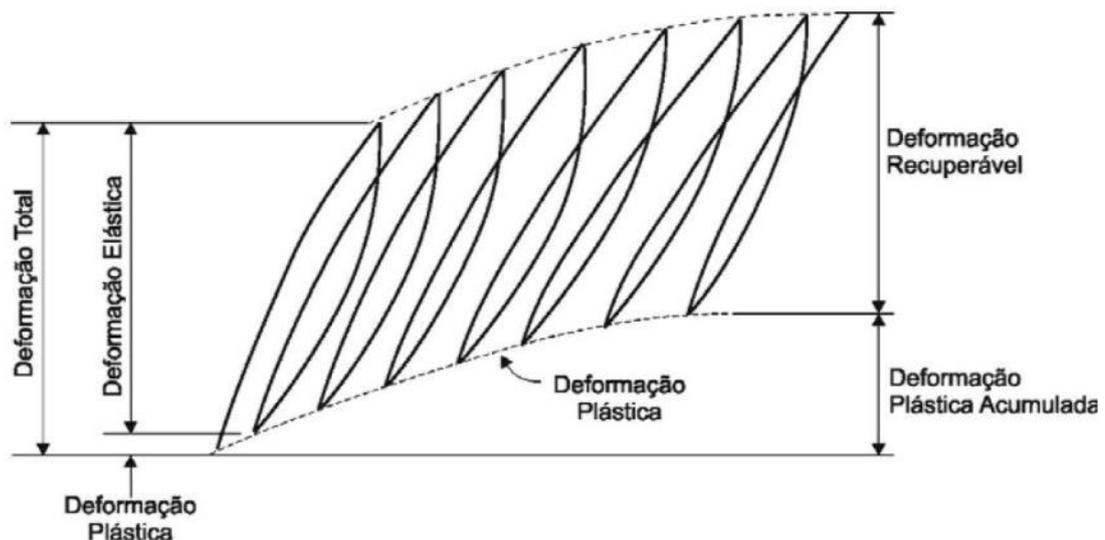
Particularmente os ensaios sob flexão são considerados os melhores procedimentos laboratoriais em termos de simulação dos esforços impostos pelo tráfego, em função da forma em que as amostras são solicitadas (YEO, 2011). Embora o processo de ensaio e fabricação das amostras sejam semelhantes, a utilização do ensaio de Flexão sob Quatro Pontos é mais difundida que o ensaio sob Três Pontos (BACK, 2022). Yeo e Midgley (2008a) recomendam que os ensaios de fadiga sejam realizados com carregamentos entre 60% a 90% da carga de ruptura do módulo flexural e que seja utilizada uma frequência de 2Hz. Considera-se ainda que ruptura por fadiga ocorre quando o corpo de prova atinge 50% do módulo inicial, um milhão de ciclos ou ainda a ruptura do mesmo (CALLISTER, 2012; YEO e MIDGLEY, 2008a). A forma, a duração e a frequência do pulso de carga são fatores que afetam consideravelmente a simulação da vida de fadiga em laboratório (SAID, 1998 apud FONTES 2009). Quando o mesmo nível de deslocamento, tanto inferior quanto superior, são aplicados nos ensaios a flexão tem-se um carregamento senoidal. Em contrapartida quando o equipamento aplica a mesma amplitude de deslocamento em apenas um sentido tem-se o carregamento semi-seno-verso (COLPO, 2014).

É importante ainda destacar que as camadas dos pavimentos acumulam deformações plásticas após o carregamento e a esse comportamento é dada a denominação de resiliência. Por definição resiliência é a capacidade de um corpo dissipar a energia armazenada ao finalizar o carregamento. De acordo com Brito (2006) em função dessa propriedade é possível avaliar o processo de degradação por fadiga. Brito (2006) avaliou ainda os parâmetros que influenciam

no ensaio de módulo de resiliência, e destaca que não é possível verificar a vida de fadiga de um material com comportamento não elástico e, sim, verificar a variação que existe na capacidade do material receber carregamento sem romper. Portanto, para verificação da vida de fadiga de materiais para pavimentação, o principal mecanismo é avaliar como o módulo de resiliência varia ao longo dos ciclos de carregamento e descarregamento.

A Figura 5 apresenta o comportamento típico de materiais de pavimentação submetidos a carregamentos cíclicos. Pode-se observar que quando um material é submetido a um carregamento existe uma parcela de deformação recuperável e uma não recuperável após o descarregamento. De forma semelhante ao módulo de elasticidade estático, obtém-se, então, o módulo de resiliência, caracterizado pela inclinação das curvas de carga e descarga em um determinado número de ciclos. No entanto ao longo do tempo, este comportamento não se mantém com as mesmas características e para grandes números de ciclos, as curvas de deformação do material tendem a inclinar-se, caracterizando a incapacidade do material em continuar absorvendo a energia a que foi submetido (BEHAK, 2013).

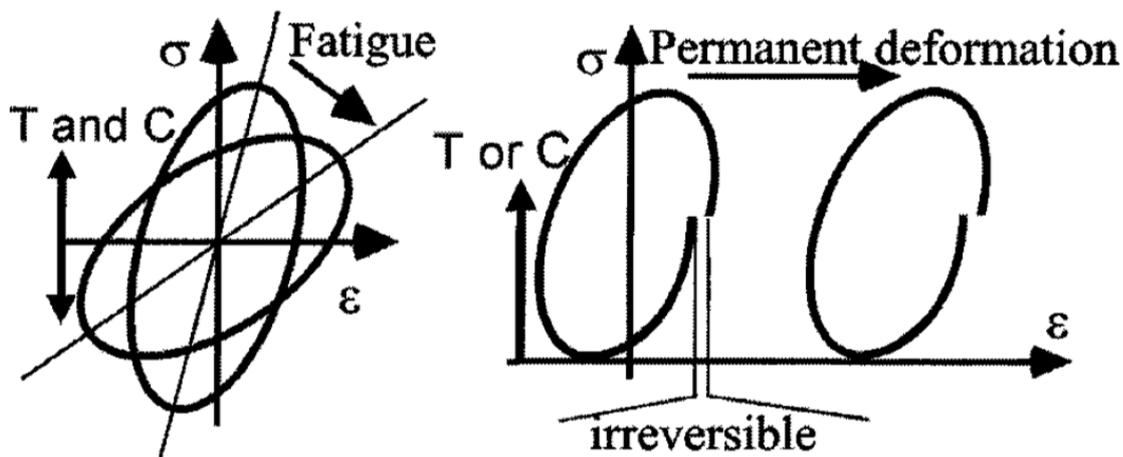
Figura 5- Comportamento típico de materiais de pavimentação submetidos a carregamentos cíclicos



Fonte: (HUANG, 1993 apud BEHAK, 2013)

A Figura 6 demonstra como ocorre o fenômeno de fadiga através de sucessivos módulos de resiliência, demonstrando que a queda significativa do módulo caracteriza a vida de fadiga do material (DI BENEDETTO *et al.*, 2004).

Figura 6 - (a) Fadiga e (b) fenômeno da deformação permanente



Fonte: (DI BENEDETTO *et al*, 2004)

2.2.7. Avaliação do ciclo de vida de pavimentos

Ao longo da vida útil de serviço, as rodovias são constantemente solicitadas normalmente culminando na deterioração ou perda da condição de rolamento (BERNUCCI *et al.*, 2008). Nesse contexto, a manutenção evita que o pavimento chegue em uma condição em que não há mais conforto e segurança para o usuário e a reconstrução permite o aumento do nível de serviço (FERNANDES *et al.*, 2011).

Cada estratégia utilizada para manutenção ou reconstrução, deve ser planejada de acordo com a situação atual do pavimento. Em cenários onde a condição de serviço tende a diminuir ao longo de tempo, essas verificações da condição do pavimento devem ser realizadas periodicamente (HAAS *et al.*, 1994).

Balbo (2007) relata que das técnicas existentes, o reforço estrutural é uma das mais frequentemente empregadas, consistindo na construção de uma nova camada de pavimento sobre o pavimento existente. Para que esses serviços possam ser realizados, faz-se necessários os serviços de fresagem, fazendo com que a camada deteriorada seja removida. No momento de remoção, essa camada torna-se matéria prima para a reconstrução do pavimento. Nesse sentido ressalta-se o interesse ambiental relacionado a redução de movimentação de matéria prima virgem e, também, a disponibilidade de duas técnicas de fresagem: a quente e à frio. Qualquer decisão tomada neste momento sobre a técnica a ser empregada impacta no consumo de energia do serviço (DNIT, 1997; BONFIM, 2007). Além desses fatores, Cabral *et al.* (2012)

realizaram um levantamento dos impactos ambientais envolvidos na exploração de agregados naturais, inclusive na saúde dos trabalhadores concluindo que qualquer técnica que diminua essa exploração pode ser considerada interessante.

Huang (2007) indica que a diminuição do uso de jazidas e, também, dos aterros de resíduos sólidos são vantagens da reciclagem de pavimentos com o uso do material fresado para fabricação de novas camadas. Copeland (2011) ressalta que as misturas que utilizam material oriundo de fresagem podem obter desempenho superior às soluções convencionais. Isso permite concluir que estas técnicas têm grande potencial de reduzir o impacto das intervenções.

Dessa forma, todas as decisões inerentes ao uso e operação de um pavimento asfáltico tomadas durante a sua vida útil irão impactar no meio onde o projeto encontra-se inserido. O impacto, não somente econômico, mas também ambiental destas decisões, deve ser sempre mensurado a fim de auxiliar na tomada de decisão. Dentre as várias técnicas existentes para mensuração do impacto ambiental gerado por intervenções em infraestrutura de transporte, a Análise de Ciclo de Vida (ACV) tem se mostrado uma opção interessante para compreensão da grandeza dos fatores intervenientes no problema (ABNT, 2009a, 2009b).

Remmen *et al.* (2007) definem a ACV como um sistema de gestão para desenvolvimentos de produtos e serviços com menor impacto ambiental possível. O uso desta ferramenta passa pela coleta, estruturação e avaliação de informações que considerem aspectos econômicos, sociais e ambientais. Os autores afirmam ainda que se utiliza dados em maior número e da maneira mais transparente possível, para que se possa mensurar a interação daquele produto ou serviço com o meio ambiente.

Segundo Hunt *et al.* (1992) o primeiro conceito de Avaliação da ACV surgiu no ano de 1969 e em um primeiro momento apenas baseava-se na ideia de que todo produto gera alguma modificação no meio ambiente. No ano de 1997 iniciou o processo de normatização que deu origem a ABNT ISO 14044 (2009). Em 1996, um dos primeiros trabalhos sobre Análise de Ciclo de Vida (ACV) em pavimentos foi realizado na Finlândia. Os autores chegaram à conclusão de que o uso de pavimentos rígidos de concreto consome menos energia, porém, os pavimentos asfálticos geram menos gases causadores do efeito estufa (HAKKINEN E MAKELA, 1996). Horvath e Hendrickson (1998) chegaram a resultados parecidos e, ainda, adicionaram preocupações com a segurança do uso desses materiais, sendo que em caso de necessidade de reparos, os pavimentos flexíveis apresentam menor consumo energético para tal finalidade. Outros trabalhos foram realizados na área, normalmente com a finalidade de comparar diferentes tipos de soluções para pavimentação (INYIM *et al.*, 2016; SANTERO *et al.*, 2011; VENTURA e JULLIEN, 2009). Schneck (2000) também utilizou ACV como

ferramenta para verificar os impactos ambientais causados pelas decisões de restauração e manutenção de pavimentos.

Alguns autores optaram por analisar apenas uma parte do ciclo de vida de pavimentos (AZARIJAFARI *et al.*, 2015; SANTERO *et al.*, 2011; ROBINETT e EPPS, 2011; SANTOS, 2014). Savietto (2017) analisou diversos trabalhos que objetivaram utilizar ACV em pavimentos, e enfatizou a grande variação de parâmetros, métodos e resultados obtidos pelas pesquisas. Invariavelmente existe a tendência de estudos relacionados com a utilização de material fresado e/ou técnicas a frio impactarem menos no meio ambiente. Alguns resultados analisados também acabam apresentando divergências. Enfatiza-se, portanto, a sensibilidade da análise a ser realizada.

Existem basicamente duas formas de trabalhar com a ACV: a primeira restringe-se, normalmente, a atribuir a um processo ou produto um consumo de energia ou volume de geração de poluentes, chamada de ACV atribucional; a outra forma de trabalhar é analisando a cadeia de produção do produto e avaliando as consequências geradas por uma mudança no processo de produção. Essa última forma de abordar a ACV chama-se consequential (WEIDEMA *et al.*, 2009).

As fases para realização da ACV partem da definição do escopo e do objetivo, levantamento do inventário de insumos, avaliação do impacto e interpretação dos resultados. Ressalta-se que essas etapas se relacionam de forma interativa e permitem a revisão e alteração durante a elaboração da análise. A definição dos objetivos deve decidir qual a aplicação da ACV, as limitações do modelo, fatores motivadores do estudo, nível de qualidade dos dados e qual o público-alvo do estudo (JRC-IES, 2010).

Nesta primeira etapa deve-se avaliar o sistema e a fronteira do estudo. Delimita-se assim, os fluxos e elementos necessários para a produção produto e/ou serviço determinado. Encontram-se as matérias primas ou energia retirada do meio ambiente e, assim, delimita-se qual o nível de aprofundamento dos levantamentos. Devido à complexidade de tal análise, alguns estudos de ACV focam em apenas parte do ciclo de vida (AZARIJAFARI *et al.*, 2015; SANTERO *et al.*, 2011).

Após esta etapa inicial, encontra-se a função e a unidade que permita a quantificação do item, dando-se o nome de unidade funcional a esta descrição qualitativa e quantitativa do produto. Esta etapa pode ser tratada como de vital importância para a qualidade da análise a ser realizada. Em ACV realizada em pavimentos utiliza-se, por exemplo, a unidade funcional “quilômetros por faixa”, porém, quanto mais complexo for o detalhamento, melhor será a confiança em comparar-se diferentes projetos. (INYIM *et al.*, 2016).

Considerada uma etapa crucial no desenvolvimento do estudo, a alocação das informações obtidas é muitas vezes de caráter complexo. O impacto da exploração de uma matéria prima pode acabar sendo distribuído para mais de um produto. Essa necessidade de alocação ocorre quando uma cadeia produtiva gera mais de um produto, ou quando existe a utilização de resíduos da cadeia produtiva de outro material (CHEN *et al.*, 2010). A alocação pode ser feita de forma física ou econômica, posteriormente repartindo-se os impactos ambientais.

A alocação física feita a partir de levantamentos de massa é mais simples, e não sofre influência do cenário econômico ao longo do tempo (WEIDEMA, 2000). Visto a dificuldade desta etapa e necessidade de confiança nos resultados obtidos, Harvey *et al.* (2014) recomendam transparência nesta etapa, sendo que não existe consenso da melhor estratégia. Weidema (2000) também ressalta como esta etapa pode ser subjetiva e altera os resultados finais.

O trabalho realizado por Chen (2010) comprovou como a alocação dos recursos altera os resultados e pode até alterar as conclusões. A escolha dos impactos ambientais a serem avaliados deve ser realizada previamente, e itens como: acidificação, destruição da camada de ozônio, depleção de recursos, eco toxicidade, mudanças climáticas e toxicidade humana são normalmente abordados (JRC-IES, 2010).

Na etapa de coleta de dados, chamada de Inventário de Ciclo de Vida, levanta-se qualquer matéria prima, gasto energético, emissões e resíduos gerados pelo processo. Deve-se sempre indicar a fonte de coleta de dados e definir níveis mínimos de qualidade de acordo com a disponibilidade. Estes dados podem ser obtidos direto com os produtores do bem, ou a partir de especialistas, referências ou cálculos. Utiliza-se comumente programas disponíveis no mercado para este fim (JRC-IES, 2010; HARVEY *et al.*, 2014).

Já na etapa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida são quantificados os impactos gerados por cada substância presente no processo. Algumas podem causar mais de um impacto ambiental, assim como pode-se ter mais de um processo gerando o mesmo tipo de substância. Surge, então, a necessidade de gerar fatores de equivalência para algumas substâncias, assim equiparando o impacto ambiental das mesmas. Mendes *et al.* (2015) realizam uma revisão dos principais métodos existentes e devido à ausência de um método sul americano, recomendam o uso de métodos globais como EDIP, TRACI e CML.

O método EDIP (Environmental Design for Industrial Products) foi utilizado por Ometto (2005) conjuntamente com outros métodos e foi considerado o mais direto para a

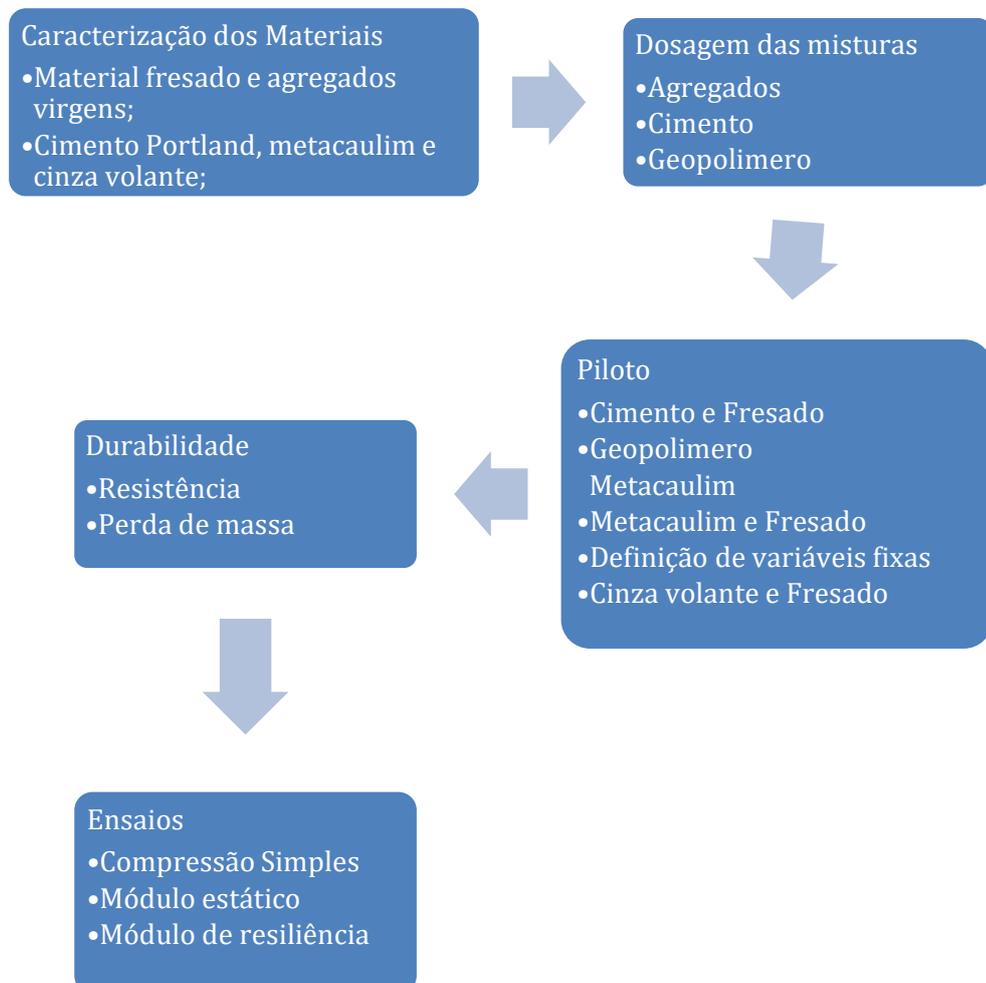
avaliação de impacto ambiental. Os resultados apresentados por este método apresentam as atividades de maiores potenciais de impacto ambiental para cada categoria. As categorias de impactos ambientais, que podem ser analisadas pelo método EDIP (1997) são: potencial de aquecimento global, potencial de acidificação, potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico, potencial de eco toxicidade e potencial de toxicidade humana.

Por fim na fase de sumarização e discussão dos resultados obtidos também se identificam as limitações do estudo, especificamente focado no alcance do estudo, consistência e sensibilidade da análise (JRC-IES,2010). Pode-se utilizar o trabalho de Weiland e Muench (2010) para exemplificar esta fase, em que os autores concluíram que dentre três alternativas para restauração de pavimentos na cidade de Seattle – EUA, reutilizar o material do pavimento antigo era a melhor alternativa. Os autores também concluíram que as etapas que mais influenciam no consumo de energia, são a produção de materiais e a produção de combustíveis e eletricidade.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

Visando atingir os objetivos gerais e específicos, apresenta-se agora a metodologia que foi utilizada para a realização deste trabalho. Baseando-se nos estudos anteriores e citados na revisão da literatura, elaborou-se a presente metodologia. A fim de familiarizar-se com os materiais e procedimentos adotados foi realizado um programa piloto que definiu todas as variáveis fixas utilizadas. A estrutura deste capítulo consiste na apresentação da metodologia final utilizada e dos estudos preliminares realizados no estudo piloto. A Figura 14 apresenta um fluxograma da metodologia utilizada.

Figura 7- Etapas do método da pesquisa.



Fonte: Próprio Autor (2022)

3.1. MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

Inicialmente para a elaboração desta pesquisa, realizou-se a caracterização e realização de misturas de material fresado e cimento para verificação do comportamento mecânico de misturas recicladas tratadas com cimento Portland. Posteriormente, incorporou-se o geopolímero como substituição do cimento Portland e verificação da capacidade desta alternativa. Para tanto, caracteriza-se na sequência os materiais utilizados.

3.1.1. Material Fresado

O material fresado asfáltico utilizado na pesquisa é proveniente da BR-285, próximo a cidade de Mato Castelhanao (km 275-276). Existindo a necessidade de compor as curvas granulométricas do material para enquadrar-se nas curvas recomendadas pelo DNIT, optou-se por utilizar agregados virgens provenientes de empresa britadora da cidade de Passo Fundo. A Figura 8 apresenta o local de extração do material fresado, e localização da jazida dos agregados virgens utilizados na pesquisa.

Figura 8 - Localização do trecho de extração do material fresado

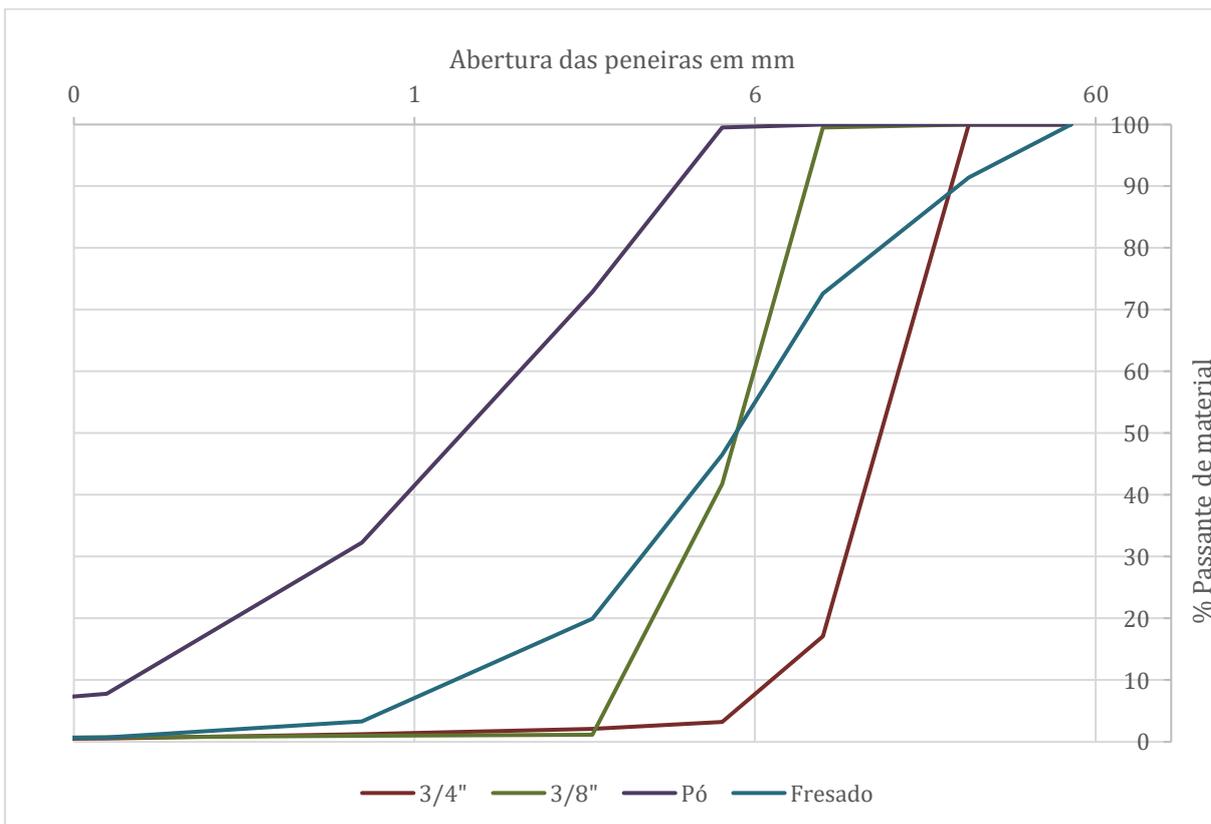


Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RioGrandedoSul_Municip_PassoFundo.svg

Para caracterização do material fresado foram utilizadas as normas do DNER. O ensaio de granulometria foi realizado para o material fresado e para os agregados virgens. Utilizando a DNER-ME 083/98, foram utilizadas três amostras para cada um dos materiais, quarteou-se as amostras a partir da dimensão máxima característica dos agregados. As amostras foram respectivamente 20 kg, 5 kg, 5 kg e 1 kg para fresado, brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra. Os materiais foram secos em estufa com temperatura de norma, porém, o fresado foi seco durante 2 dias a uma temperatura de 60 + ou - 5oC, de modo a se evitar a evaporação do betume. A série de peneiras utilizadas para a caracterização granulométrica dos materiais, foram: n° 200, 40, 10, 4, 3/8", 1" e 2".

A Figura 9 apresenta os resultados obtidos na caracterização granulométrica. Pode-se observar que o fresado acaba ficando próximo a média dos outros materiais virgens. Ressalta-se que esse resultado foi obtido com o material reciclado com o ligante betuminoso, apenas retirando-se os torrões maiores do que 2". Outro fator importante a ressaltar é que o material fresado em estudo, trata-se de material de camada superficial do revestimento da pista. Não tratando-se portanto de objeto de restauração profunda.

Figura 9 - Curvas granulométricas do fresado, brita 3/4", 3/8" e pó de pedra



Fonte: Próprio Autor (2022).

Para identificar o teor de umidade do material fresado, foi utilizada a norma DNER-ME 196/98. A amostra foi definida através da dimensão máxima característica do agregado, que é 50 mm. Utilizou-se uma amostra de 8 kg, essa foi dividida em três frações menores de aproximadamente 2,17 kg.

As amostras foram pesadas e, logo em seguida, secas em estufa na temperatura de 60 + ou - 5oC. Quando essas apresentaram constância de massa, foram retiradas das estufas e pesadas novamente. Após obtermos massa inicial e final, foi possível calcular o teor de umidade através da Equação 1, apresentada a seguir.

$$h = \frac{M_i - m_f}{M_f} * 100$$

Equação 1

Onde:

h = teor de umidade total em %;

M_i = massa inicial da amostra;

M_f = massa final da amostra.

Para determinar a porcentagem de betume presente do material fresado, foi utilizada como referência a norma DNER-ME 053/94 que contém um método para a extração do betume através do Rotarex. A realização do ensaio foi feita com três amostras de aproximadamente 700 g, colocadas uma de cada vez no aparelho extrator com solvente. O aparelho centrifuga a amostra dissolvendo o betume, separando-o do agregado, após o agregado é seco em estufa. A massa da amostra antes do ensaio subtraída da massa de agregado seco, é igual a massa de betume extraída. Dividindo-se a quantidade de betume extraído pela massa inicial da amostra, tem-se o teor de betume, conforme Equação 2:

$$TB = \frac{(M_i - M_f)}{M_i} * 100$$

Equação 2

Mi = massa antes do ensaio;

Mf = massa do agregado seco após o ensaio;

TB = teor de betume em %.

O resultado das três amostras pode ser observado na Tabela 4, os resultados foram próximos, sendo que a média é igual a 5,45%, o coeficiente de variação dos resultados ficou menor do que 5%.

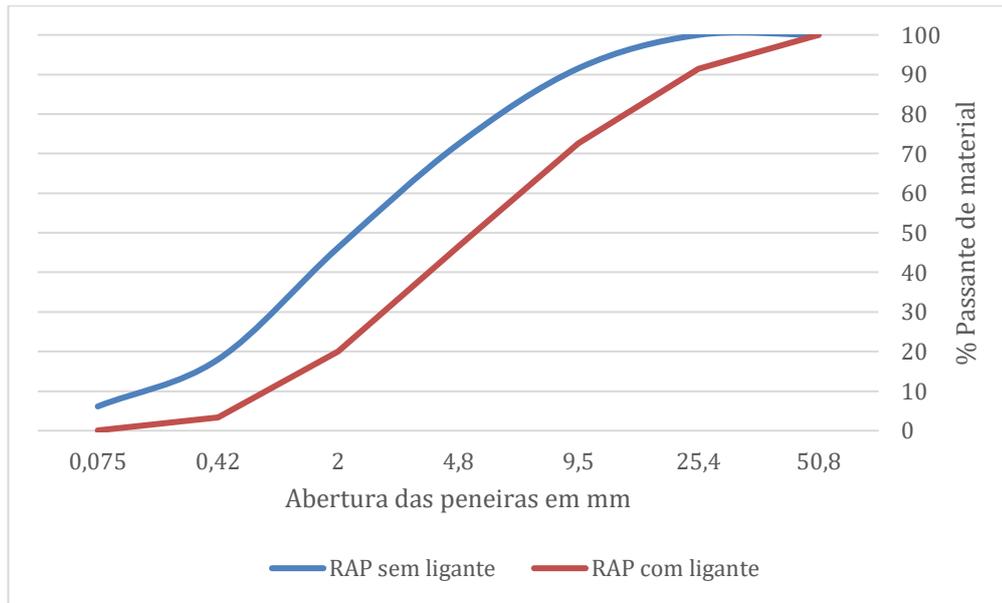
Tabela 4 - Resultado do teor de betume do material fresado

Amostra	Teor de Betume
1	5,67%
2	5,50%
3	5,17%
Média	5,45%
Desvio	0,25%
CV	4,67%

Fonte: Próprio Autor (2022).

Após a extração do ligante asfáltico, realizou-se a análise granulométrica do material fresado, permitindo de forma aproximada verificar a granulometria original do material. A Figura 10 apresenta a curva do material fresado após o ensaio do Rotarex, percebe-se que a curva tem uma leve alteração comparando-se com o material original ensaiado ainda com a presença do ligante asfáltico.

Figura 10 - Curvas granulométricas do fresado com e sem a presença de betume



Fonte: Próprio Autor (2022).

No ensaio de massa específica e absorção, foi utilizada a norma DNER-ME 195/97. Utilizou-se três amostras secas em estufa na temperatura de 60 ± 5 °C, obtendo-se o peso seco (P_s). Em seguida, o material de cada amostra foi imerso em água por 24 horas. Passando esse tempo, as amostras foram retiradas da água e secas superficialmente para que se determinasse a massa das mesmas na condição saturada superfície seca (P_h). Após isso, o material foi colocado num cesto de arame e imerso em água, de maneira que fosse possível obter o peso das amostras imersas em água (P_i). Utilizou-se as Equações 3, 4 e 5 para calcular a massa específica aparente (MEA), real (MER) e a absorção (A) do material fresado asfáltico:

$$MEA = \frac{P_s}{P_h - P_i} \quad \text{Equação 3}$$

$$MER = \frac{P_s}{P_s - P_i} \quad \text{Equação 4}$$

$$A = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100 \quad \text{Equação 5}$$

Na Tabela 5 pode-se observar os resultados do ensaio de massa específica e de absorção de água, ressalta-se que os valores calculados ficaram todos com coeficientes de variação menores do que 2%.

Tabela 5 - Resultado de Massa específica e absorção

Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Média	Desvio	CV
Ps (g)	2523,84	Ps (g)	2553,68	Ps (g)	2828,23	2635,25	167,7902	6,37%
Pi (g)	1487,15	Pi (g)	1492,09	Pi (g)	1652,49	1543,91	94,06547	6,09%
Ph (g)	2603,3	Ph (g)	2631,74	Ph (g)	2915,03	2716,69	172,3551	6,34%
MEA	2,26	MEA	2,24	MEA	2,24	2,25	0,011994	0,53%
MER	2,43	MER	2,41	MER	2,41	2,42	0,01675	0,69%
A	3,15%	A	3,06%	A	3,07%	3,09%	0,000497	1,61%

Fonte: Próprio Autor (2022).

3.1.2. Cimento Portland

O Cimento utilizado na pesquisa foi o Cimento de Alta Resistencia Inicial (CP V-ARI), pois apresenta grande acréscimo de resistência nas primeiras idades. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland, os valores aproximados de resistência à compressão deste tipo de cimento chega a 26 MPa no primeiro dia, e passa dos 50 MPa aos 28 dias, superando assim valores normativos de 14 MPa, 24 MPa e 34 MPa para 1, 3 e 7 dias, respectivamente.

3.1.3. Precursores

Para a realização deste trabalho, foram utilizados dois precursores. Metacaulim e cinza volante, ambos de padrão comercial e obtidos pelas empresas que fazem o transporte do material. A massa específica do metacaulim comercializado no Brasil gira em torno de 2,60 g/cm³, esse valor foi verificado com o uso da norma NBR NM 23 (ABNT, 2001), o resultado encontrado foi de 2,56 g/cm³

Realizou-se ensaio de Fluorescência de Raios-x do Metacaulim, a relação entre SiO₂ e Al₂O₃ encontrada foi de 1,56, o que pode ser considerado adequado para a produção de geopolímero. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos no ensaio sem os compostos que apareceram em valor inferior a 0,1%.

Tabela 6 - Fluorescência de Raios-x do Metacaulim

SiO ₂	57,45%
Al ₂ O ₃	36,84%
Fe ₂ O ₃	2,31%
Na ₂ O	1,48%
TiO ₂	1,57%
CaO + MgO	0,11%
SO ₃	0,10%
Na ₂ O	0,10%

Fonte: Próprio Autor (2018).

A cinza volante utilizada foi oriunda da usina termelétrica de Charqueadas. A Figura 11 apresenta o aspecto visual da cinza utilizada. Para caracterização do precursor, inicialmente foi realizada a secagem dos materiais em estufa regulada na temperatura de 100°C durante 24 horas e peneiramento em peneiras de abertura 75µm. Foram avaliadas as propriedades físicas relativas ao comportamento granulométrico das partículas pelo Método de Sedimentação, segundo norma NBR 7181 (ABNT, 2016) e, a massa específica, de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e no Laboratório de Materiais de Construção Civil, ambos no Centro Tecnológico da Universidade de Passo Fundo.

Figura 11 - Cinza volante utilizada



Fonte: Próprio Autor (2022).

Com o mesmo preparo descrito para os ensaios físicos, as propriedades químicas foram avaliadas com: reconhecimento dos compostos químicos que constituem a amostra, utilizando o método de Fluorescência de Raios-X (FRX) no aparelho Espectrômetro Brucker S2 Ranger, com auxílio do software Spectra EDX. Forma em que a estrutura atômica está organizada, através da técnica de Difração de Raios-X (DRX) no aparelho Brucker DS Phaser, com auxílio do software Diffrac.eva.

O método constitui a utilização de Raios-X, por efeito fotoelétrico, ionizar átomos da amostra analisada. Com os átomos ionizados, ocorre a dissipação da radiação recebida, liberando o excesso de energia através da emissão de fótons, com energia igual à diferença de energia de ligação dos níveis entre os quais ocorreu a transição, sendo essa, característica de cada elemento. A técnica utilizada caracteriza-se como não destrutiva. A preparação do ensaio inicia-se com o preenchimento de um cilindro metálico, vazado em duas faces, sendo uma protegida por plástico filme. Coloca-se cerca de 10 gramas da amostra a ser analisada no recipiente.

Com o intuito de complementar as análises químicas, pretende-se determinar como a estrutura atômica está organizada. Procura-se a utilização difração de Raios-X para verificar se o material precursor tem potencial de reatividade e se a mesma ocorreu. Os resultados deste método são obtidos através da emissão de feixe de Raios-X, onde o mesmo difrata em um cristal desconhecido, sendo a medida do ângulo dessa difração capaz de fornecer os dados necessários para a construção do gráfico que permite observar a organização atômica da amostra. A preparação para o ensaio consiste em preencher o molde do equipamento, adensando e rasando,

deve-se tomar o devido cuidado para não deixar vazios na superfície ou interior da amostra. Os ensaios foram realizados no Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias, na cidade de Soledade – RS.

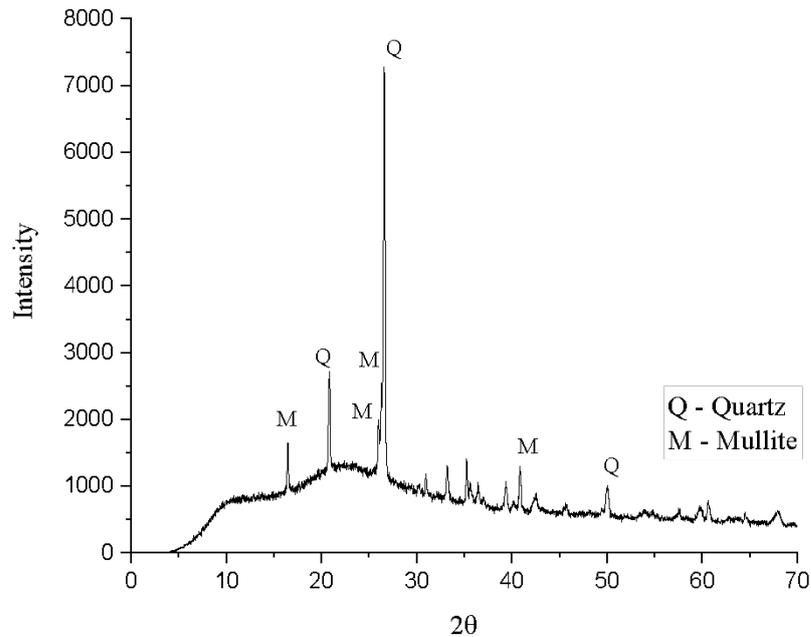
A massa específica do material precursor foi obtida por meio de frasco volumétrico Le Chatelier e querosene, inicialmente, com o cuidado para não haver contato entre o reagente com as laterais do frasco, preencheu-se os frascos Le Chatelier com querosene até um nível compreendido entre as marcas 0 e 1, sendo anotada a indicação do frasco como “V1”. Utilizando quantidades conhecidas de precursor, foram inseridas juntamente com o querosene, deslocando o líquido até nível entre 18 cm e 24 cm. Os volumes de ar entre o material sólido e reagente foram eliminados através de movimentos circulares. Com a ausência de bolhas de ar no interior do frasco, foram realizadas as leituras de volume da mistura, denominada “V2”. A determinação da massa específica se deu o uso da Equação 6.

$$Me = m/(V_2 - V_1)$$

Equação 6

Os principais picos de quartzo e mulita foram detectados pelo padrão DRX na região de 15°-50° 2θ conforme mostrado na Figura 12. Materiais alcalinos ativados produzidos com hidróxido de sódio exibem regularmente menor resistência mecânica em comparação com misturas produzidas com ativadores à base de silicato (PROVIS et al., 2005). Desta forma, dois compostos foram usados como ativadores a fim de estabelecer as condições adequadas para a ativação do precursor. As ativações dos precursores foram realizadas utilizando uma combinação de solução de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio. Devido ao menor custo e alcance de eficiência razoável, o ativador NaOH tem sido utilizado em diversas pesquisas. Neste estudo, um composto de pérolas de NaOH com 99% de pureza foi dissolvido em água e adicionado os precursores para atingir uma molaridade de 10 mols.

Figura 12 – Composição mineralógica da Cinza volante



Fonte: Próprio Autor (2022).

3.1.4. Ativadores

Provis (2009) aponta o hidróxido de sódio (NaOH) como um ativador alcalino barato e de boa eficiência, sendo o mais utilizado comumente. Os geopolímeros produzidos com hidróxido de sódio regularmente apresentam uma menor resistência mecânica comparados a sistemas produzidos com ativadores baseados em silicatos (PROVIS; LUKEY; VAN DEVENTER, 2005). Ressaltada esta necessidade, serão utilizados dois compostos como ativadores a fim de serem criadas melhores condições para a ativação do precursor. Ambos serão previamente dissolvidos em água, de acordo com a metodologia de dosagem.

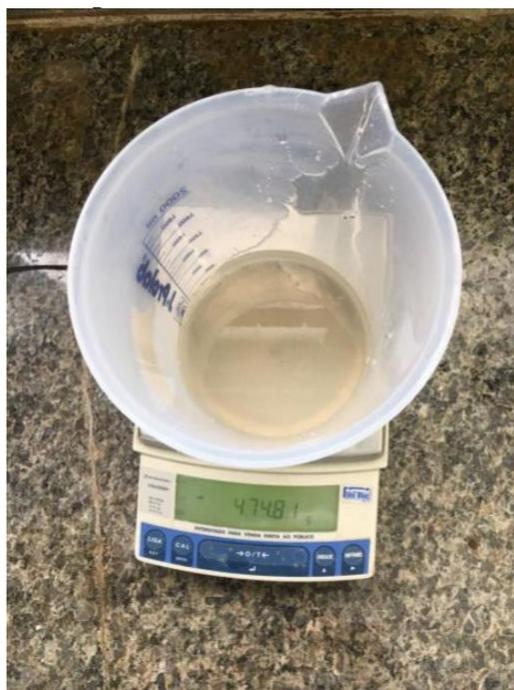
Devido à disponibilidade, utilizou-se hidróxido de sódio laboratorial, com grau de pureza 99%. O estado sólido do hidróxido de sódio (em escamas) permitiu a preparação de soluções com diferentes teores de concentração molar. Com peso molecular de 40 g/mol, contabilizando 400 gramas a cada litro de H₂O, obtendo 10 Mols por litro. Diferentemente, usou-se um silicato de sódio comercial, principalmente devido ao alto custo encontrado para Silicato de Sódio laboratorial. As principais características físico-químicas do silicato de sódio alcalino, apresentadas pelo fornecedor do produto, são observadas na Tabela 7, a Figura 13 apresenta o aspecto visual do material adquirido.

Tabela 7 - Características físico-químicas do Silicato de Sódio

Parâmetros	Valor
Densidade 25°C (g/cm ³)	1,58
Teor de Na ₂ O (%)	14,8
Teor de SiO ₂ (%)	32
Relação (% SiO ₂ / Na ₂ O)	2,15
Teor de Sólidos (%)	46,8

Fonte: Adaptado de Manchester Soluções Químicas (2015).

Figura 13 - Aspecto do silicato de sódio empregado



Fonte: Próprio Autor (2022).

3.1.5. Água

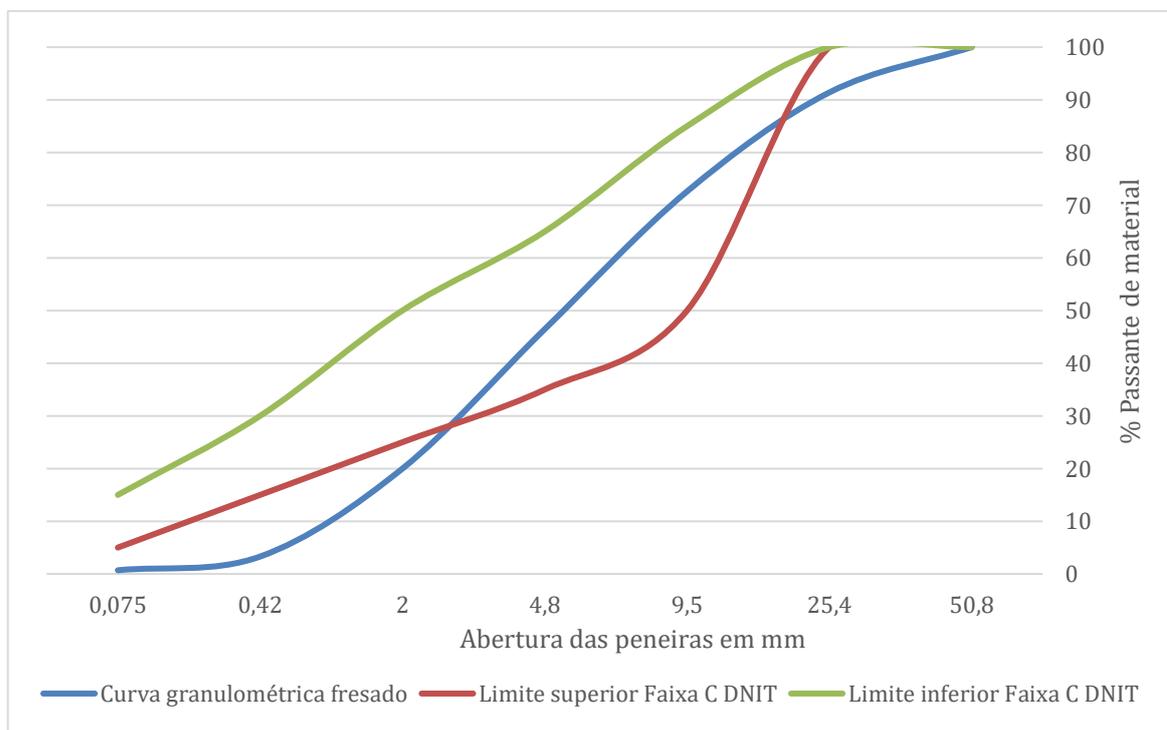
A água utilizada foi a disponível no Laboratório de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Engenharia Civil da Universidade de Passo Fundo, Campus I em Passo Fundo - RS. Trata-se de água subterrânea extraída e reservada na rede de água fria do Prédio R2.

3.2. DOSAGEM DAS MISTURAS

O planejamento da presente pesquisa se dá pela determinação de uma mistura de material fresado com agregados virgens, junto com a adição de Cimento Portland de Alta Resistencia Inicial (CP V-ARI), analisando o efeito desse nas características mecânicas das misturas. Posteriormente, propõe-se a substituição do cimento Portland por ligante alternativo, seguindo as mesmas composições granulométricas das misturas. Para composição das misturas, objetivou-se o uso da maior quantidade de material fresado possível, visando sempre a maior utilização de resíduo possível. Optou-se por utilizar misturas com 20, 45 e 70% de fresado. Foram escolhidas essas quantidades, também, para observar a relevância da quantidade de fresado nas características mecânicas de bases e sub-bases de pavimentos. Sabe-se que pelas normas do DNIT, o valor máximo recomendado de utilização de material fresado é de 50%.

Como observado no ensaio de análise granulométrica, o material fresado possui uma deficiência de finos e, por esse motivo, foi necessário a criação de composições de fresado com agregados virgens, de forma que a curva granulométrica melhor se encaixasse na faixa C do DNIT. Na Figura 14 é possível observar a curva granulométrica do material fresado comparado com a faixa C do DNIT.

Figura 14 - Curva granulométrica do material fresado e faixa C do DNIT



Fonte: Próprio Autor (2022).

Mesmo após estudo das composições, observou-se que elas não atendiam perfeitamente a Faixa C da norma DNIT 141/2010. As composições para 20, 45 e 70% de material fresado que melhor se adaptaram a Faixa C do DNIT são apresentadas na Tabela 8. Pode-se observar que, assim como esperado, a maior fração de agregado virgens necessárias foi a parcela de agregados finos. Não utilizou-se areia para completar a curva granulométrica, essa decisão baseou-se na expectativa de que maior teor de material fino iria aumentar a demanda por água para homogeneização da mistura.

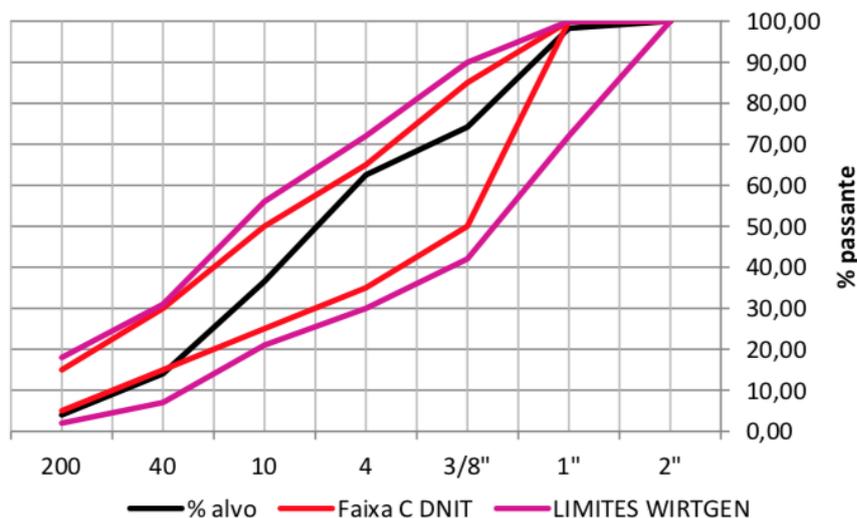
Tabela 8 - Composições para 20, 45 e 70% de fresado

FRESADO	3/4"	3/8"	PÓ
20%	21%	21%	38%
45%	10%	12%	33%
70%	0%	0%	30%

Fonte: Próprio Autor (2022).

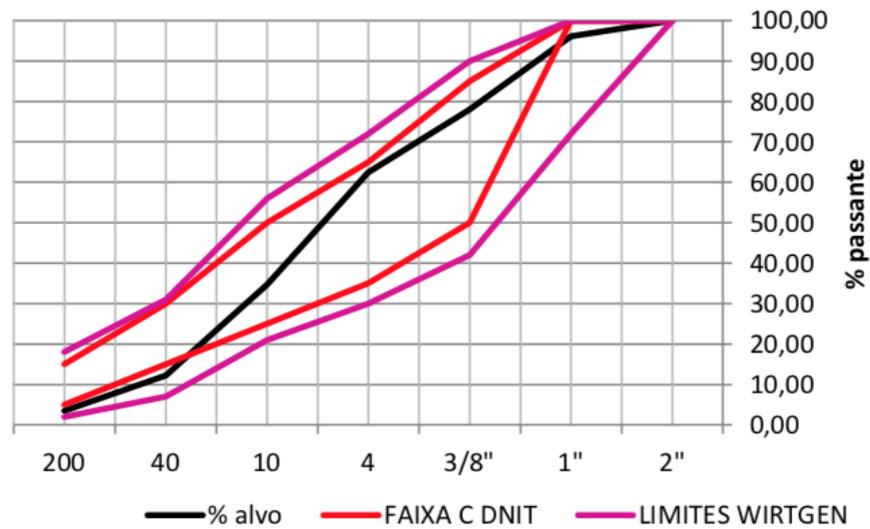
Além da faixa C do DNIT, foram testados os limites granulométricos da empresa WIRTGEN, com o intuito de comparar um método nacional com uma referência internacional. São apresentadas as curvas granulométricas das composições de 20, 45 e 70% de fresado nas Figuras 15, 16 e 17, assim como os limites granulométricos do DNIT e da WIRTGEN.

Figura 15 - Curva granulométrica da mistura com 20% de fresado



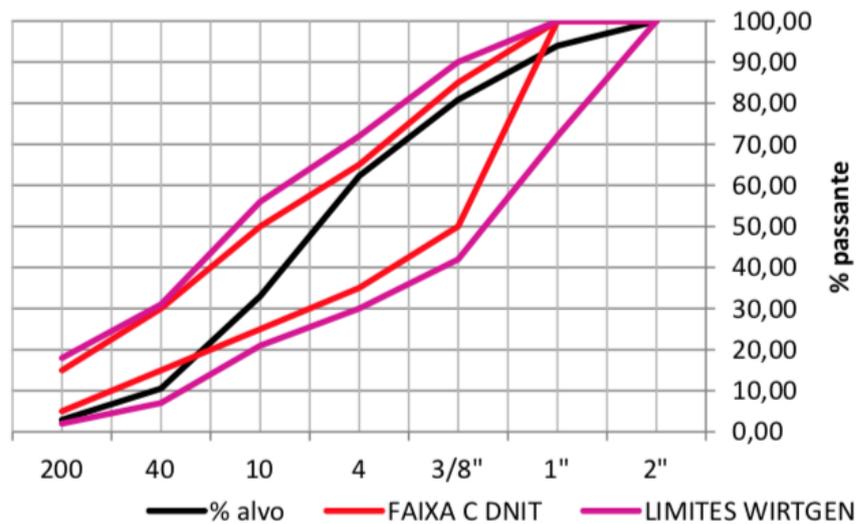
Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 16 - Curva granulométrica da mistura com 45% de fresado



Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 17 - Curva granulométrica da mistura com 70% de fresado



Fonte: Próprio Autor (2022).

Observa-se que a curva granulométrica não atende perfeitamente à faixa C do DNIT, faltando finos. Já, quanto aos limites da Wirtgen, houve completo enquadramento da curva de projeto recomendado pelo fabricante dos equipamentos utilizados para fresagem. Mesmo com a carência de finos em relação aos limites do DNIT, foram realizadas misturas nessas proporções.

Depois de dosar as misturas de fresado e agregado virgem, e determinar as curvas granulométricas para os diferentes teores de material fresado (20, 45 e 70%), realizou-se o

ensaio de compactação Proctor. Obtendo-se o teor de umidade ótima e a massa específica aparente das misturas com adição de cimento Portland e, também, com adição de geopolímero.

3.2.1. Dosagem do material fresado com cimento

Para moldagem dos corpos de prova, inicialmente definiram-se algumas variáveis independentes baseando-se na revisão da literatura: peso específico da mistura, a umidade, a quantidade de cimento e a quantidade de fresado. Os teores de fresado foram estipulados em 20, 45 e 70%, já os teores de cimento foram de 2, 4 e 6%. As variáveis fixas estabelecidas são o tempo de cura em 7 dias, o tipo de cimento - CP V-ARI e a energia modificada no ensaio Próctor. Tais variáveis fixas foram estudadas e estão descritas no início do próximo capítulo.

Para cada mistura, foram moldados três corpos de prova, os quais receberam a nomenclatura de acordo com a quantidade de cimento e fresado. Por exemplo: 1-2-20 significa ser o primeiro corpo de prova da mistura com 2% de cimento e 20% de fresado.

3.2.2. Dosagem do material fresado com geopolímero

Visando uma possível aplicação prática em campo, dosou-se um geopolímero de forma objetiva. O presente trabalho não tem como objetivo principal caracterizar os produtos da ativação alcalina, ou dosar o ligante alternativo do ponto de vista de estequiometria. Portanto, seguindo os resultados publicados pela Austroads (2016), foi utilizado hidróxido de sódio como ativador. Sua utilização justifica-se por ser o ativador mais barato e de fácil obtenção. A molaridade da solução ativadora foi fixada em 10M e, como fonte alternativa de silicato, foi utilizado um silicato de sódio comercial. A relação solução/precursor será fixada em 0,5 e testou-se 3 teores de silicato de sódio, 10%, 20% e 30%.

Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizados três teores de geopolímero em relação a quantidade de material fresado, portanto, foram testados os teores de 10%, 20% e 30%. Para ajuste da quantidade de água necessária na obtenção da umidade ótima de compactação, adicionou-se o suficiente de água descontando-se a quantidade de água presente na solução ativadora. Portanto, o procedimento de moldagem foi precedido pela preparação da solução ativadora 24 horas antes. Inicialmente precedeu-se a mistura do teor de cinza a ser testado e a solução ativadora na relação sólido líquido fixada. Após ser realizada a mistura manual, foi adicionado o geopolímero no material fresado e homogeneizado como na cimentação com cimento Portland. Materiais devidamente homogeneizados, foram moldados

os corpos de prova definidos a seguir, que serão curados em estufa a 50°C durante as 24 primeiras horas. Para nomenclatura dos corpos de prova, foi utilizado o mesmo padrão utilizado para as amostras com cimento Portland. Todas as variáveis fixas também foram estudadas e constam descritas no início do próximo capítulo.

3.3. ENSAIOS MECÂNICOS

3.3.1. Ensaio de compactação

Para a realização do ensaio, foi utilizado o cilindro grande e soquete com massa de 4,536 kg. A compactação foi feita em 5 camadas de 56 golpes cada, e o ensaio foi realizado sem reuso de material. O material fresado foi seco na estufa a uma temperatura $60 \pm 5^\circ\text{C}$, e os demais agregados na temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$. No dia da realização do ensaio, adicionou-se 4% de cimento em relação a massa de fresado com agregados virgens, e homogeneizou-se a mistura. Inicialmente adicionou-se um teor de umidade (w) de 3,4%, os acréscimos subsequentes foram de 1% a cada nova mistura. A Figura 18 apresenta o aspecto dos materiais antes da adição de água para o ensaio de Proctor.

Figura 18 - Mistura dos materiais antes da adição de água no Ensaio Proctor



Fonte: Próprio Autor (2022).

Ao final da compactação de cada ponto, foi recolhido uma amostra representativa, a qual passou na peneira n° 4 e permaneceu na estufa por 24 horas. Após este período, realizou-se o teor de umidade da mistura, utilizando-se a Equação 7.

$$w = \frac{P_s - P_h}{P_s} * 100$$

Onde:

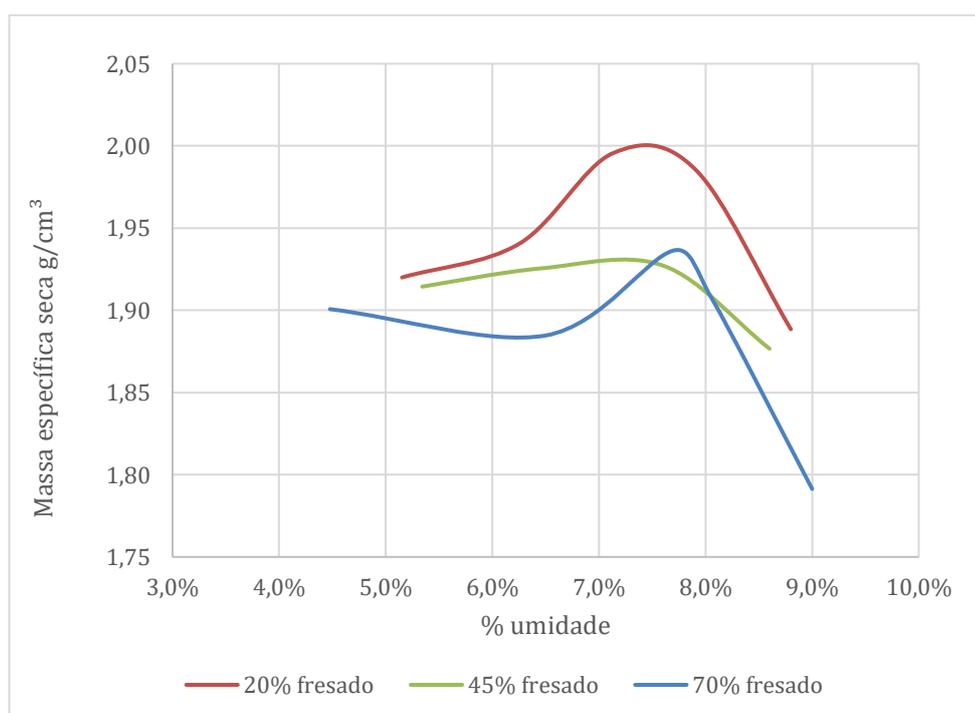
w = teor de umidade em %;

P_s = peso seco da amostra;

P_h = peso úmido da amostra.

Também verificou-se a massa do cilindro antes do ensaio e depois, obtendo-se assim, a massa da amostra. Realizou-se o cálculo da massa específica do solo úmido e, em seguida, do solo seco. Após encontrar as massas específicas secas e as umidades das misturas, traçou-se a curva de compactação para verificar a massa específica seca máxima e a umidade ótima. Na Figuras 19 são apresentadas as curvas de compactação para as misturas com teores de fresado de 20, 45 e 70%.

Figura 19 - Curva de compactação das composições



Fonte: Próprio Autor (2022).

Seguindo a mesma metodologia utilizada por Hoy (2016), para a cimentação com geopolímero, foi realizado o ensaio de proctor sem adição de solução para obtenção da umidade ótima apenas com água, cinza volante e material fresado. Repetiram-se os mesmos teores de fresado utilizados para a cimentação com cimento Portland. Visando isolar a variável compactação e umidade ótima, optou-se por utilizar o mesmo teor encontrado para cimento Portland nas misturas de geopolímero.

3.3.2. Resistência à compressão simples

Para a moldagem dos corpos de prova, foi feita a média entre as massas específicas secas máximas e a umidade ótima dos três teores de fresado, com isso todos os corpos de provas foram feitos com o objetivo de obter a mesma densidade e umidade. Foram adotadas como tolerância 0,1 g/cm e 1% para massa específica e umidade, respectivamente. Os cilindros usados foram de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, o soquete utilizado para compactar foi o de Proctor grande. Na Tabela 9 são apresentados os dados para moldagem dos CP.

Tabela 9 - Dados utilizados na moldagem dos corpos de prova

Volume cilindro:	1570,8	cm ³
γ_d :	1,95	tolerância +- 0,1 g/cm ³
w:	7,10%	tolerância +- 1%

Fonte: Próprio Autor (2022).

Os teores de fresado utilizado, como já dito, foram de 20, 45 e 70%, apenas com o material passante na peneira 1". Já o cimento Portland, foi adicionado em teores de 2, 4 e 6% para verificar a influência do mesmo nas propriedades mecânicas das misturas. Para cada mistura, foram moldados três corpos de prova para obtenção de uma média. Ao total, seriam 27 corpos de prova, porém, moldou-se mais uma mistura com material fresado passante na peneira 2", para que fosse feita uma comparação na resistência à compressão simples das misturas com grãos de fresado maiores (passante na peneira 2"), com grãos menores (passante na peneira 1"). A composição escolhida para esse comparativo foi a composição com 2% de cimento e 20% de material fresado. O teor de cimento adicionado foi em relação a massa de agregado e o teor de água em relação a mistura de agregado + cimento. A quantidade de material preparada para cada corpo de prova foi calculada através da relação volume do cilindro (1570,80 cm) com

densidade (1,95 g/cm). Dessa maneira encontra-se a quantidade de material de 3063,05g. Adicionou-se 10% de material extra para casos de perda durante a realização do ensaio, utilizou-se 3369,36 g. Calcula-se através da massa total a quantidade de agregados e, depois, se subtrai a massa de agregados da massa total, encontrando a quantidade de cimento. A Tabela 10 apresenta um exemplo da dosagem de material para moldagem dos corpos de prova.

Tabela 10 - Exemplo de dosagem para moldagem de corpo de prova

Agregado + cimento:		3369,36		
Agregado:	FRESADO	3/4"	3/8"	PÓ
100%	20%	21%	21%	38%
3239,77	647,95	680,35	680,35	1231,11
Cimento:	129,59			
Água:	239,22			

Fonte: Próprio Autor (2022).

A compactação foi realizada em cinco camadas de 4 cm com a mesma quantidade de material, porém, com quantos golpes fossem necessários para a obtenção da densidade de 1,95 g/cm. Depois de compactado o corpo de prova, uma amostra foi retirada da mistura para que fosse verificado o teor de umidade.

Verificou-se a massa molde cilíndrico antes e após a moldagem para obter-se a massa do corpo de prova úmido. Após isso, o corpo de prova ficou 24 horas plastificado dentro do molde e, então, foi desmoldado e levado para câmara úmida por 7 dias antes do ensaio de resistência à compressão simples.

Como objetivo da pesquisa, pretendeu-se avaliar as características técnicas das misturas em diferentes temperaturas. Para resistência à compressão simples, foi realizado numa temperatura média de aproximadamente 25°C. Como descrito anteriormente, os corpos de prova ficaram durante 7 dias na câmara úmida e, posteriormente, foram levados à câmara climatizada a uma temperatura de 25 ± 2 °C, onde permaneceram por 24 horas antes do rompimento. A prensa utilizada para o rompimento foi uma prensa hidráulica, a uma taxa de carregamento 0,45 MPa/s. Foram utilizados discos de Neoprene nas extremidades dos corpos de prova para nivelar a área de contato no momento em que fosse aplicado o carregamento.

3.3.3. Ensaio de tração na flexão e módulo estático

O ensaio de tração na flexão foi realizado de acordo com a norma ASTM - C78-08 (2008), ensaiaram-se 2 amostras aos 7 dias para todas as cimentações. Os corpos de prova cimentados com CP-V foram curados em câmara úmida e os CPs cimentados com geopolímero em estufa durante 24 horas e depois em sala climatizada. Este ensaio apresenta-se como base para obtenção de informações para posterior realização da análise do comportamento do material sob cargas cíclicas.

A Equação 8 será aplicada para a determinação da resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$) para o ensaio realizado com um cutelo.

$$f_{ct,f} = (P \times l) / (b \times h^2) \quad \text{Equação 8}$$

onde:

P : carga de ruptura;

l : comprimento do vão entre os dois apoios;

b : largura da base do corpo-de-prova;

h : altura do corpo de prova.

Além da caracterização de resistência de tração na flexão, o ensaio permite também a análise do comportamento dos diagramas de tensão deformação. Portanto, é possível verificar a deformação específica de tração durante o ensaio até o momento da ruptura, o que permite o cálculo do Módulo Elástico Dinâmico (MED).

Os ensaios estáticos foram realizados de acordo com o descrito na norma D1635-M (ASTM, 2012) e utilizando o relatório 789 da NCHRP (2014). Foram fabricados 2 corpos de prova de 15 x 15 x 45 cm para cada tipo de cimentação com cura de 7 dias. Inicialmente, carrega-se a viga com uma carga de 20N e zera-se as medidas de deformação do LVDT, assim iniciando o ensaio. O carregamento observou a velocidade de 690 + ou - 39 kPa/min até a ruptura do corpo de prova. Registradas as deformações dos corpos de prova pode-se gerar os diagramas de tensão deformação. A Figura 22 apresenta a compactação dos corpos de prova sendo realizada. Para este ensaio foi utilizado 3 vigas de cada teor em estudo. Tal definição objetivou obter-se pares de vigas que posteriormente seriam submetidas com razões de tensão diferentes para poder-se obter as equações de fadiga correspondentes.

Figura 20 – Compactação dos corpos de prova 15x15x45



Fonte: Próprio Autor (2022).

3.3.4. Ensaio de módulo de resiliência

Para realização do ensaio de módulo de resiliência, utilizaram-se as normas do DNIT-ME 181 (2018), DNIT-ME 134 (2018), DNIT-ME 135 (2018) e da Austroads (2008). Foram moldados um total de 6 corpos-de-prova para cada tipo de cimentação, a dimensão de 15cm x 15cm x 45cm. Os corpos-de-prova foram ensaiados no Laboratório de Infraestrutura da Universidade de Passo Fundo. A Figura 22 apresenta o aspecto final dos corpos de prova após a moldagem. Destaca-se aqui que a única referência que trata do uso das vigas é a documentação

da Austroads, sendo as outras normas, 181 para materiais estabilizados quimicamente, 134 para solos e 135 para misturas asfálticas.

Figura 21 – Corpos de prova 15x15x45



Fonte: Próprio Autor (2022).

O equipamento utilizado foi construído para a realização deste trabalho, trata-se de um pistão pneumático, que proporciona um carregamento repetido pulsante com o auxílio de um regulador de tempo e frequência instrumentado com uma placa de aquisição de dados (Figura 22).

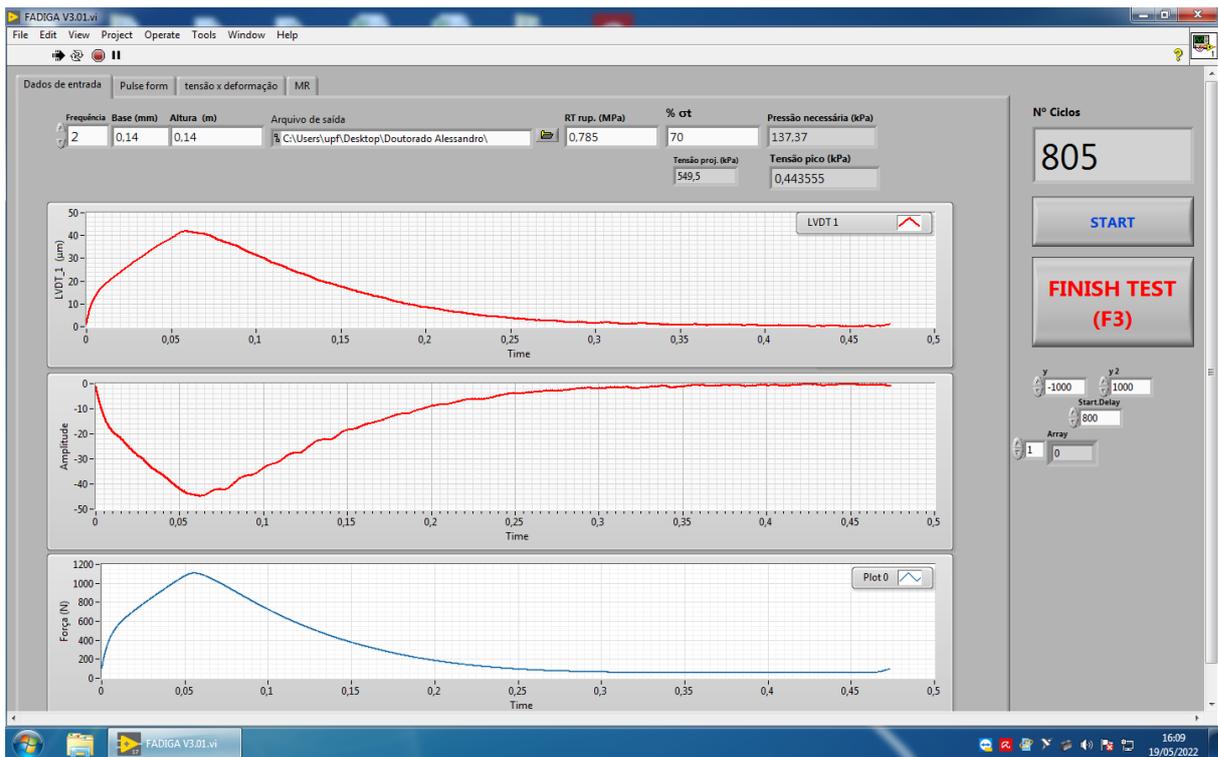
Figura 22 - Equipamento para ensaio de carregamentos cíclicos



Fonte: Próprio Autor (2022).

O Módulo de Resiliência (MR) é obtido com cargas aplicadas no corpo de prova com velocidade de aplicação de carga semi-senoidal de 0,1 segundo, seguida de um repouso de 0,9 segundo. A deformação causada no corpo de prova com esse ensaio é medida por dois LVDT (Linear Variable Differential Transducer), a carga aplicada é relativa a resistência a tração da mistura e o coeficiente Poisson é fixado em 0,30, conforme recomendação da DNER-ME 135 (2010). Na Figura 29 é possível observar a tela de aquisição de dados do software desenvolvido para realização dos ensaios.

Figura 23 – Tela do software utilizado para os ensaios estáticos e cíclicos



Fonte: Próprio Autor (2022).

3.4.1. Molhagem e secagem

Para realização da avaliação de durabilidade das misturas foi utilizada a norma NBR 13554. Desta forma, após a moldagem os corpos de prova (CP's) devem permanecer ao menos 24 horas em ambiente climatizado antes de qualquer ensaio. Todas as dimensões de cada corpo de prova que será ensaiado, tais como: diâmetro, altura e massa anterior ao ensaio são medidas. O diâmetro e altura devem ser obtidos através de 3 medidas ao longo do CP fazendo uso do paquímetro, sendo realizada uma média aritmética dos valores obtidos. Após os dados iniciais serem obtidos, parte-se para o início do processo de ciclagem, composto por ciclo de molhagem e de tempo em estufa.

Primeiramente devem ser postos dentro de tanque submerso os CP's que serão ensaiados, e ali devem permanecer pelo tempo de 5 horas. Ao final desse período, é utilizada peneira metálica (50x50cm) para deixar os corpos escorrerem por aproximadamente 30 minutos. Então é realizada uma secagem superficial, que consiste em passar um pano nos CP's, antes de realizar a pesagem dos mesmos. Após são colocados na estufa (já aquecida), por um período de 42 horas, numa temperatura de 71°C ($\pm 2^\circ\text{C}$). Ao finalizar o tempo em estufa, é realizada a escovação do corpo, constituído pela aplicação da escova 2 vezes ao longo de todas

as faces do CP. Após a escovação do corpo é retirada as medidas do mesmo, como realizado inicialmente, após o processo encontra-se pronto para um novo ciclo. De maneira geral foram obtidos dois resultados nesta etapa do trabalho. Os resultados de perda de massa dos corpos de prova ao longo dos ciclos e, qual foi a influência que a ciclagem causou nas resistências mecânicas dos corpos de prova.

4. RESULTADOS

4.1. CIMENTAÇÃO DO MATERIAL FRESADO E CIMENTO PORTLAND

De maneira a definir as variáveis fixas dentro da pesquisa. Realizaram-se alguns testes correlatos que embasam e justificam as escolhas feitas no decorrer dos estudos. Apresenta-se inicialmente neste capítulo os resultados obtidos a fim de escolher as diretrizes do programa experimental. Após apresentam-se os testes realizados a fim de avaliar a possibilidade de utilização de geopolímero para cimentação de material fresado. Romperam-se dois grupos de misturas, sendo um com 2% de cimento e 20% de fresado, contendo material fresado passante na peneira 2" e outro com 4% de cimento e 20% de fresado com material passante na peneira 1". Na Tabela 11 são apresentados os resultados de resistência à compressão simples dos corpos de prova, assim como as massas específicas e umidades obtidas.

A Figura 29 apresenta o gráfico com os resultados obtidos com a adição de Cimento Portland em composições de material fresado. Percebe-se que a variabilidade dos dados com 6% de cimento é relativamente maior do que os menores teores. Atribui-se esse comportamento aos defeitos que foram observados no momento da moldagem dos corpos de prova com maior percentual de material seco. Esse aumento do consumo de água causado pelo aumento de teor de cimento dificultou a moldagem dos corpos de prova. Os dados apresentam o comportamento esperado e mostram um provável acréscimo de resistência com aumento do teor de cimento.

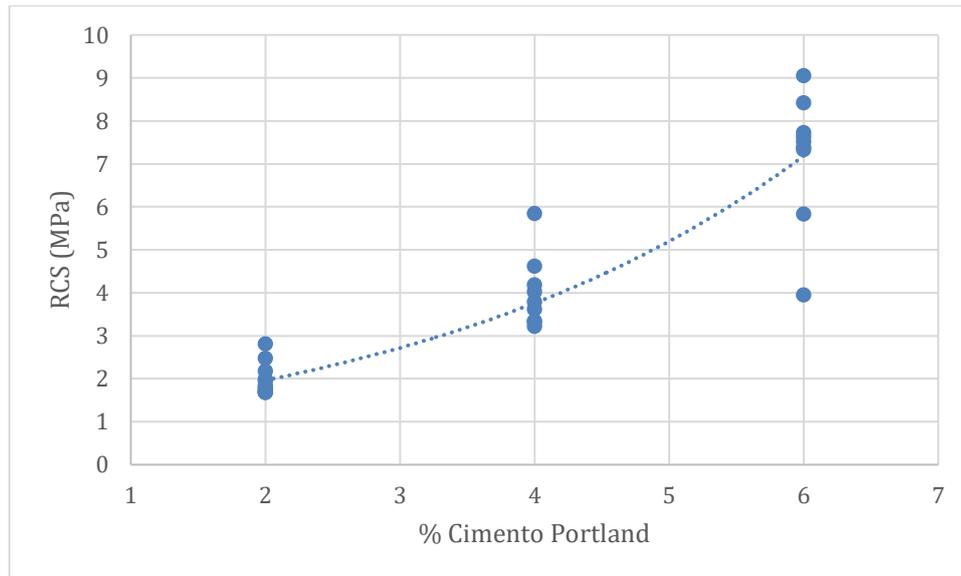
Outro resultado que pode ser observado na Tabela 11 é que, comparando-se os mesmos teores de cimento, inicialmente não se percebe influência significativa do teor de material fresado. Esse resultado preliminar incentiva a verificação de resultados estatisticamente representativos que atestem a possibilidade de utilização de altos teores de material reciclado para bases cimentadas.

Tabela 11 - Resultados preliminares cimentação com Cimento Portland

% cimento	% fresado	CP	Y _d	Umidade	RCS	MÉDIA	Desvio padrão	C.V.
2	20*	1	1,95	7,3%	1,79	1,72	0,0635	3,7%
2		2	1,91	7,8%	1,68			
2		3	1,93	7,9%	1,68			
2	20	1	1,98	6,9%	2,48	2,49	0,3151	12,7%
2		2	1,99	7,2%	2,18			
2		3	2,00	6,7%	2,81			
4	20	1	1,98	7,4%	3,32	3,43	0,1677	4,9%
4		2	1,97	7,5%	3,34			
4		3	2,01	6,8%	3,62			
6	20	1	3,69	6,9%	9,05	8,33	0,7742	9,3%
6		2	2,01	6,5%	7,51			
6		3	1,99	6,4%	8,42			
2	45	1	1,98	6,8%	1,68	1,83	0,1550	8,5%
2		2	1,98	6,8%	1,83			
2		3	2,00	6,6%	1,99			
4	45	1	1,98	6,4%	4,18	4,60	1,0885	23,6%
4		2	1,97	6,6%	3,79			
4		3	1,98	6,8%	5,84			
6	45	1	2,00	6,7%	7,72	7,58	0,1705	2,3%
6		2	2,02	6,1%	7,39			
6		3	1,99	6,6%	7,63			
2	70	1	1,96	6,6%	1,76	1,80	0,1209	6,7%
2		2	1,99	6,7%	1,94			
2		3	1,96	7,0%	1,71			
4	70	1	1,97	6,7%	4,02	3,95	0,7023	17,8%
4		2	1,97	6,8%	4,62			
4		3	1,98	6,6%	3,22			
6	70	1	*	*	7,33	5,70	1,6935	29,7%
6		2	*	*	3,95			
6		3	*	*	5,83			

Fonte: Próprio Autor (2018).

Figura 24 - Resultados de RCS da cimentação com cimento Portland



Fonte: Próprio Autor (2018).

4.2. FABRICAÇÃO DE GEOPOLÍMERO PILOTO

Inicialmente para definirem as variáveis fixas do estudo com geopolímero, optou-se por testar-se tempo de cura, relação sólido/líquido, temperatura, molaridade, tipo e quantidade de geopolímero. Procurou-se utilizar o precursor com melhor resultado de bibliografia (cinza volante), porém, para estes estudos, foram realizados inicialmente com Metacaulim.

Prepararam-se amostras de pasta geopolimérica em moldes metálicos com dimensões de 40x40x160 mm. Cada observação utilizou 3 corpos de prova, entende-se por observação cada relação solução/precursor, cada idade de ruptura, cada tempo e temperatura de cura. A Tabela 12 apresenta as relações solução/precursor utilizadas e, também, a quantidade de material para moldagem dos corpos de prova.

Tabela 12 - Materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova de geopolímero

Solução/ Precursor (g/g)	Metacaulim (g)	Precursor (g)
0,83	1200	1000
0,77	1300	1000
0,71	1400	1000

Fonte: Próprio Autor (2018).

Para a moldagem dos corpos de prova tomou-se cuidado de proceder todas as misturas da mesma maneira. Adaptando as orientações da norma NBR 7215 (ABNT, 1996), em um misturador mecânico de movimento planetário, despejou-se toda a solução ativadora e o precursor, misturando-a durante 60 segundos em velocidade baixa e posteriormente 60 segundos em velocidade alta.

Visto a experiência obtida com os ensaios realizados em cimento Portland, esperava-se dificuldade para a homogeneização das amostras utilizando geopolímero. Testou-se a pasta produzida adaptando-se o ensaio da NBR 13276 (2016), portanto, utilizando a mesa de consistência realizaram-se testes de abatimento das 3 razões de solução/precursor a serem testadas (Tabela 13). Das 3 razões testadas, não é possível moldar misturas com material fresado na razão de 0,71. A Figura 25 mostra o aspecto do material após o processo de homogeneização.

Tabela 13 - Resultados da mesa de consistência para o geopolímero

	Relação Sólido Líquido (g/g)		
Abatimento (mm)	0,83	0,77	0,71
	245	230	205

Fonte: Próprio Autor (2018).

Figura 25 - Aspecto do geopolímero logo após o processo de homogenização



Fonte: Próprio Autor (2017).

A moldagem nas formas ocorreu imediatamente após o amassamento, despejou-se argamassa nas formas metálicas prismáticas, onde os corpos de prova adensaram-se com 30 golpes de uma mesa de adensamento. Adotou-se cura térmica de 75o C por um período de 5 horas. Analisou-se as razões entre solução e precursor para definir um geopolímero potencial para ser utilizado na cimentação de material fresado. Utilizando a NBR 13279 (ABNT, 2005), verificou-se a tração na flexão e posterior resistência à compressão. Executaram-se ensaios de compressão e tração na flexão no geopolímero produzido conforme indicações da norma NBR 13279 (ABNT, 2005). Visto que os corpos de prova prismáticos apresentam duas superfícies regulares, não foi realizado capeamento ou retifica das amostras. Posicionaram-se os corpos de prova que receberam o carregamento nas faces regulares. Realizou-se o ensaio de tração na flexão, acomodou-se o centro do corpo de prova perpendicularmente ao ponto de inserção das cargas. O posicionamento das amostras pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 - Ensaio de tração na flexão



Fonte: Próprio Autor (2017).

A resistência à tração foi calculada através da carga suportada pelo corpo de prova utilizando-se a Equação 9.

$$Rt = \frac{1,5 \cdot Ft \cdot L}{40^3}$$

Equação 9

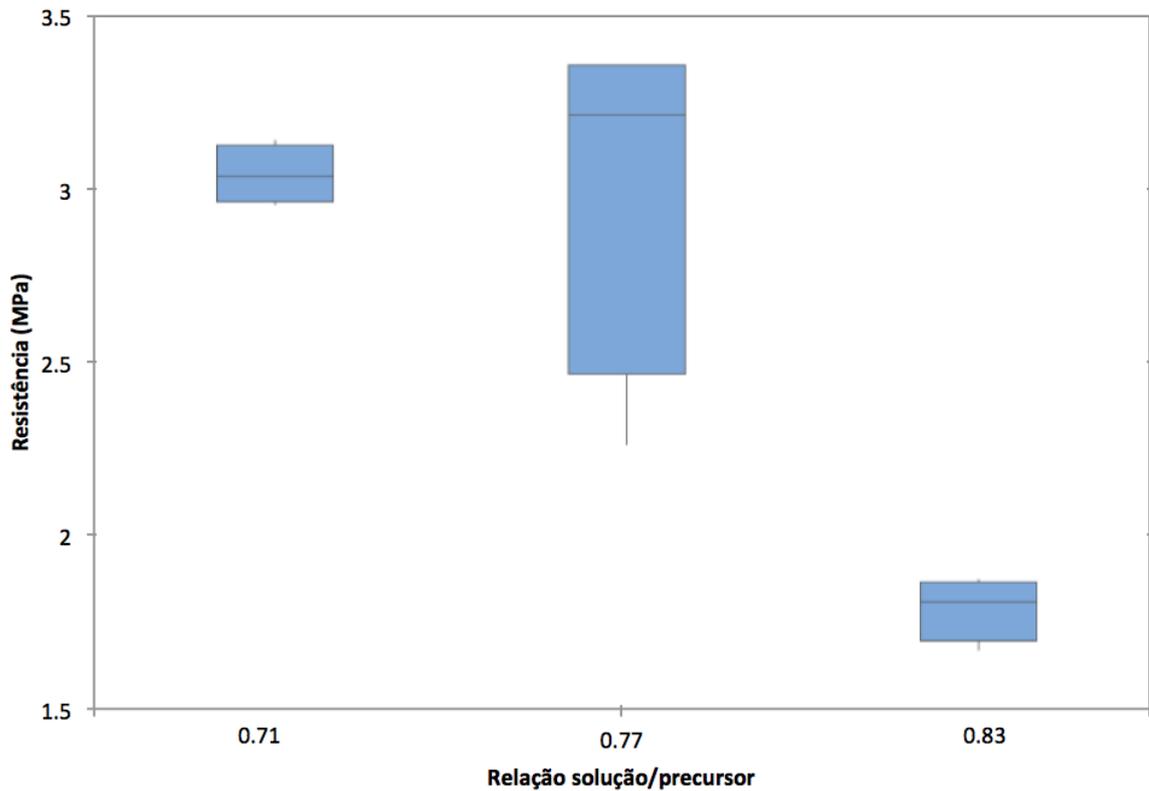
Sendo:

Ft = carga suportada, em Newton;

L = distância entre os suportes, em milímetros.

Dando sequência ao ensaio, o rompimento a flexão gera duas frações da mesma amostra. Ambas as amostras foram carregadas e o esforço de compressão avaliado, a tensão axial suportada é obtida pela divisão da carga suportada pela área de transferência do carregamento. Os corpos de prova para ensaio de flexão não obtiveram resistência compatível com a sensibilidade da célula de carga disponível no laboratório, os resultados à compressão estão elencados no gráfico tipo boxplot, da Figura 27.

Figura 27 - Boxplot da resistência e relação solução/precursor



Fonte: Próprio Autor (2017).

Utilizando estes dois critérios iniciais, definiu-se que a relação solução/precursor adequada de acordo com resistência a compressão e trabalhabilidade seria a 0,77. Sabendo-se que tempo de cura e temperatura influenciam as propriedades de geopolímeros, testaram-se algumas possibilidades. A cura à 23° C é adotada como temperatura ambiente padrão, feita em sala de temperatura e umidade controlada. O processo de cura adotado para definir a melhor solução para ser utilizada no restante da pesquisa, foi o primeiro elencado na Tabela 14.

Tabela 14 - Tempos de cura e temperatura testados

Tempo de cura	Temperatura
5 horas	70o C
36 horas	50o C
5 dias	23o C
7 dias	
14 dias	

Fonte: Próprio Autor (2018).

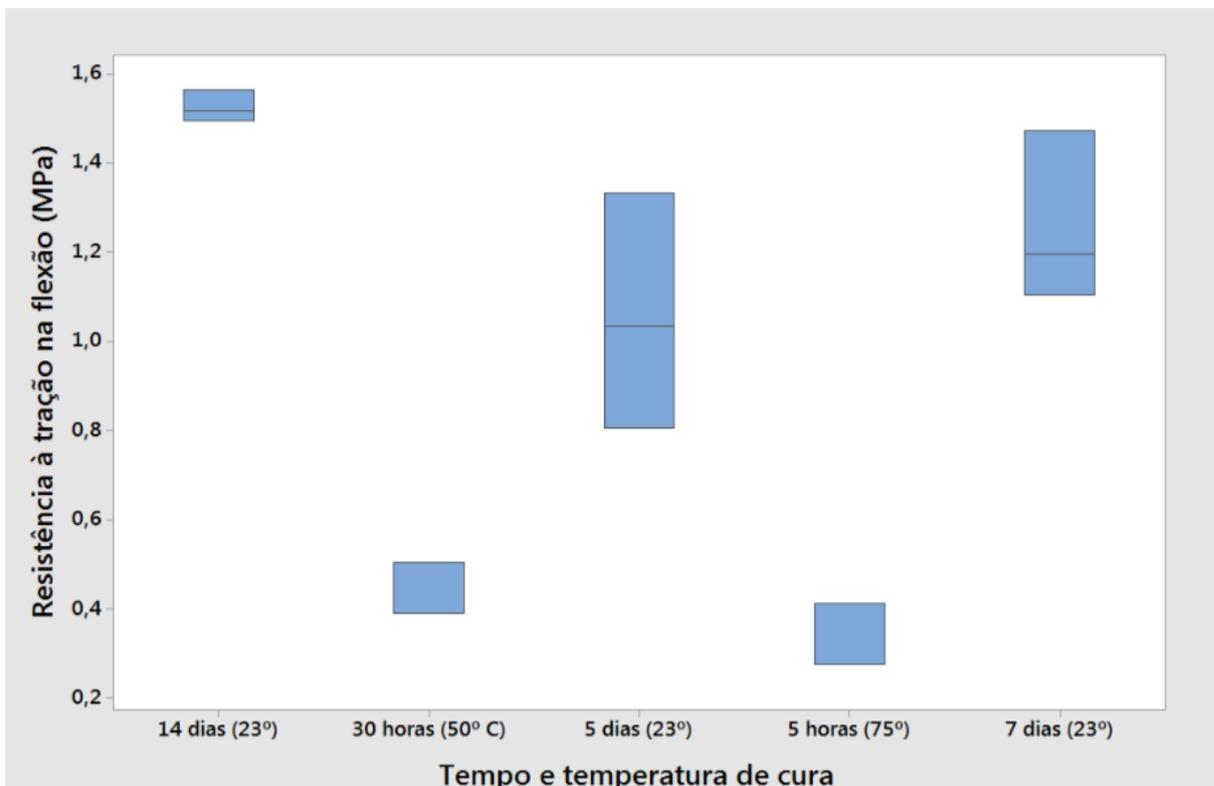
O experimento apresentado a seguir teve como objetivo principal avaliar o potencial de aplicações práticas da técnica proposta. Em campo, durante uma provável aplicação em obra com reconstrução de uma rodovia, existiriam algumas limitações relacionadas ao tempo de cura e, principalmente, temperatura. Portanto, o objetivo do teste foi avaliar possibilidades de tempo e cura visando aplicações de campo. Observa-se que os corpos de prova curados em estufa apresentaram várias trincas, provavelmente de retração durante a secagem, acredita-se que isso possa ser o motivo para as baixas resistências. Outra informação importante é que no caso da cura térmica, os corpos de prova foram removidos da estufa e imediatamente ensaiados, outro motivo que poderia justificar estes resultados. O aspecto visual dos corpos de prova onde realizou-se a cura térmica podem ser observados na Figura 28. Os resultados obtidos para resistência a tração na flexão estão apresentados na Figura 29.

Figura 28 - Aspecto visual dos corpos de prova curados em estufa



Fonte: Próprio Autor (2017).

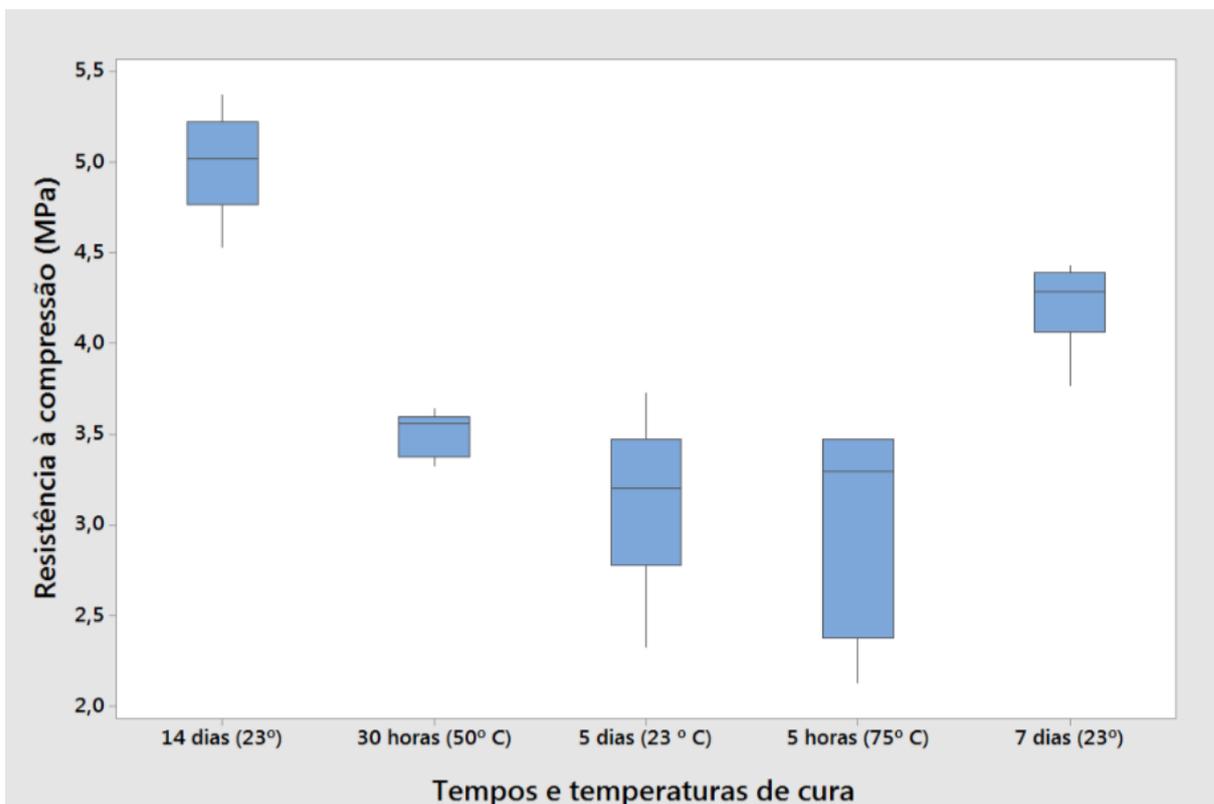
Figura 29 - Resistência a compressão do geopolímero em diferentes tempos e temperaturas



Fonte: Próprio Autor (2017).

Percebe-se com os resultados apresentados, que a resistência à tração na flexão é em média próximo a 1 MPa, aparentemente o tempo de cura tem mais influência do que a temperatura. As amostras que foram curadas em estufa (menor idade de ruptura) apresentaram resultados inferiores aos resultados obtidos com amostras ao ar. Comparando-se a resistência obtida aos 5, 7 e 14 dias, pode-se concluir que a diferença de tempo de cura, não apresenta vantagem no ganho de resistência mecânica à flexão superior a 15%. Para as datas de 5 e 7 não pode-se descartar a possibilidade de igualdade das observações. Os resultados observados para resistência mecânica à compressão são apresentados na Figura 30.

Figura 30 - Resistência à tração na flexão do geopolímero em diferentes tempos e temperaturas



Fonte: Próprio Autor (2017).

Da mesma maneira como observado para os resultados de resistência a tração na flexão, percebe-se que a cura térmica parece dispensável. Adotando-se maiores tempos de cura, os resultados foram semelhantes e/ou superiores. Observa-se, também, que existe uma certa relação entre resistência à tração na flexão e resistência à compressão, porém, visto não ter sido foco deste teste, não se obtiveram muitas informações. Não obstante a isso, de forma imprecisa esta relação ficou em aproximadamente 30% para a amostra com 14 dias de cura em

temperatura ambiente. De maneira geral, no decorrer da pesquisa foi notado que para os corpos de prova maiores a dificuldade de cura era fator limitante no processo. As vigas que foram utilizadas para carregamentos cíclicos (15x15x45 cm) não se curavam no interior dos corpos de prova na idade de ruptura. Por tanto a opção de realizar para todas as observações cura inicial de 24 horas a 50°C.

4.3. CIMENTAÇÃO DE FRESADO COM GEOPOLÍMERO DE MATACAULIM

Após a realização das etapas anteriores, iniciou-se a obtenção da mistura de fresado asfáltico cimentada com geopolímero. Iniciaram-se as tentativas com a quantidade de 10% de geopolímero em relação a massa total de fresado asfáltico. Neste momento, verificou-se a visualmente a necessidade da incorporação de um percentual maior, para que todas as frações do material fresado fossem envolvidas. Adotou-se, então, mais dois valores, sendo eles quantificados em 20% e 30%. Os corpos de prova foram moldados com densidade específica seca de 1,95 g/cm³. Ressalta-se que, neste momento, não foram realizadas composições e a cimentação foi realizada com 100% de material fresado. Adotou-se a tolerância de 0,1 g/cm para massa específica. Moldaram-se dois corpos de provas com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Para facilitar o processo de compactação, o material de cada composição foi dividido em cinco partes iguais, procedendo-se a compactação com a utilização de um soquete Proctor. Aplicou-se a energia necessária para deixar cada uma das cinco camadas com 4cm de espessura. Os resultados de resistência à compressão foram obtidos conforme o que sugere a NBR 5739 (ABNT, 2007), adotou-se 4 corpos de prova para cada teor de incorporação de geopolímero, rompidos com 7 dias de cura. A Figura 31 mostra a configuração do equipamento utilizado para o ensaio de resistência à compressão simples.

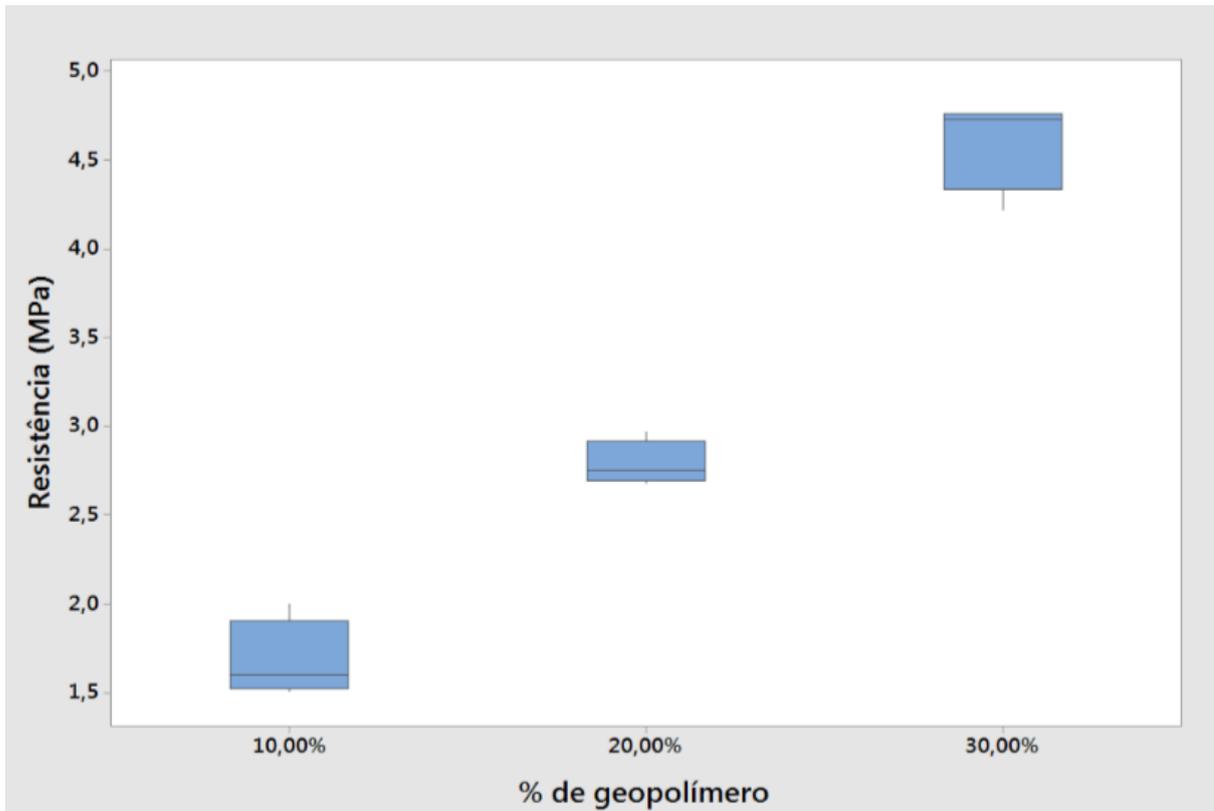
Figura 31 - Prensa EMIC em ensaio de compressão simples



Fonte: Próprio Autor (2017).

A Figura 32 apresenta os resultados obtidos para a cimentação de material fresado com geopolímero. Encontrou-se como comportamento, que o acréscimo de geopolímero causa aumento na RCS. Utilizando-se a norma DNIT 143 (DNIT, 2010), que trata de bases de pavimentos utilizando solo-cimento, a resistência a compressão mínima foi atingida (2,1 MPa aos 7 dias). Portanto, a mistura com 20% de geopolímero seria suficiente para atender requisitos de projeto. Caracterizou-se também a densidade dos corpos de prova e a média foi de 1,98 g/cm³.

Figura 32 - Resistência à compressão simples de material fresado cimentado com geopolímero



Fonte: Próprio Autor (2017).

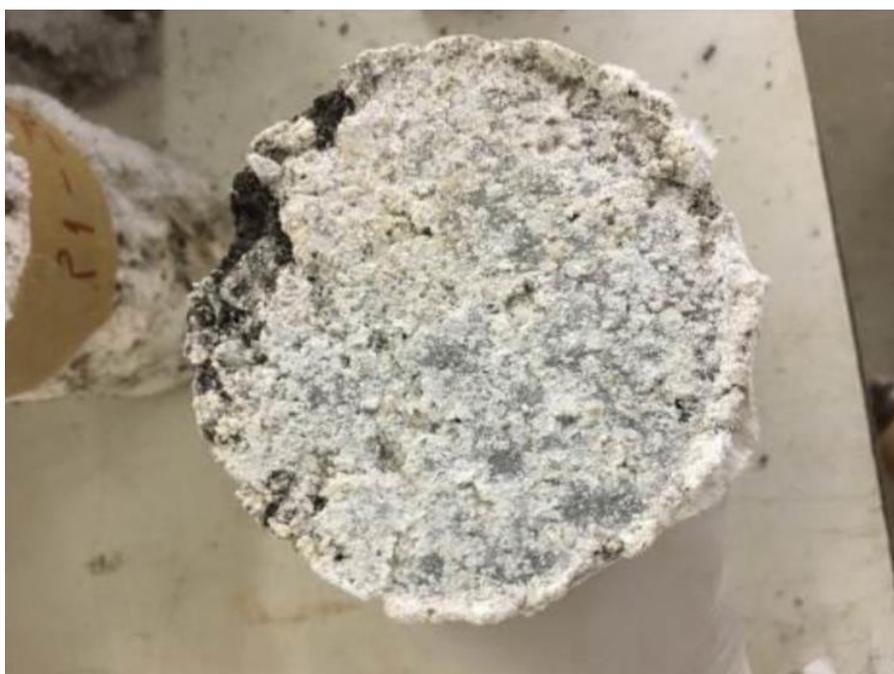
Além dos resultados obtidos, pode-se adicionar as impressões visuais sobre a técnica. Os corpos de prova apresentaram superficialmente uma cristalização (Figura 33). A primeira hipótese seria a precipitação do hidróxido de sódio excedente das misturas. Nota-se também que quanto menor o teor de geopolímero, menor foi a presença deste fenômeno (Figuras 34 e 35).

Figura 33 - Corpos de prova com teor de 30% de geopolímero aos 7 dias



Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 34 - Corpos de prova com teor de 20% de geopolímero aos 7 dias



Fonte: Próprio Autor (2017).

Figura 35 - Corpos de prova com teor de 10% de geopolímero aos 7 dias



Fonte: Próprio Autor (2017).

4.4. CIMENTAÇÃO DE FREZADO COM GEOPOLÍMERO DE CINZA VOLANTE

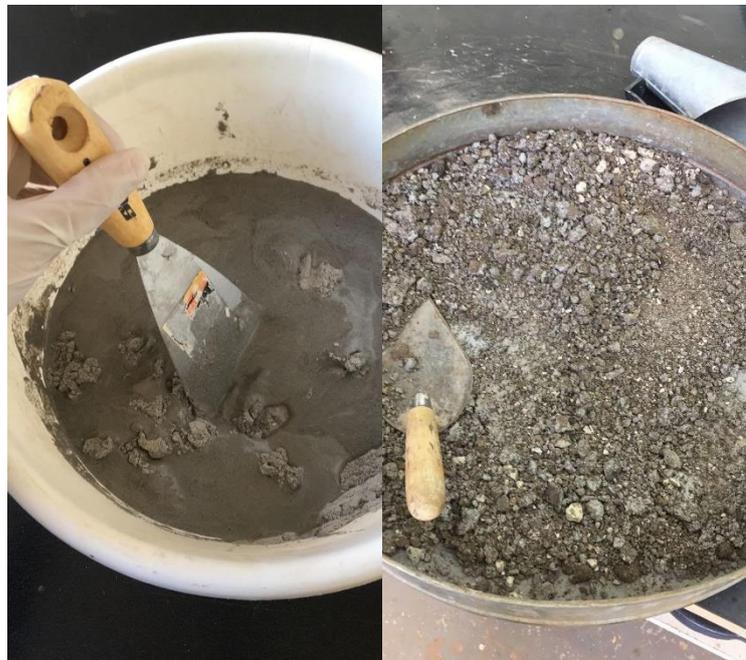
Partindo-se dos resultados até aqui apresentados, realizaram-se alguns experimentos para melhor conhecer a mistura com cinza volante a ser utilizada no restante deste trabalho. Novamente como realizado para as misturas de cimento Portland, iniciou-se pelo ensaio de Proctor. Definiu-se que o ensaio seria realizado com teor de fresado em relação ao material virgem fixado em 45% e teor de cinza em 20%, valores médios utilizados até aqui para demais materiais. Variou-se o teor da solução de silicato entre 20 e 30%, entende-se como solução a mistura de água, NaOH e silicato de sódio. A solução de NaOH utilizada teve a concentração de 10 mols, portanto, a solução utilizada para correção de umidade e ativação da cinza era a mesma, variando-se o teor de silicato sobre o total.

O objetivo principal desta etapa foi verificar a possibilidade de misturar a solução e corrigir a umidade para melhor compactação ao mesmo tempo. Hoy (2016; 2017) utilizou-se de metodologia distinta, a mistura do material seco com a solução era realizada em duas etapas, sendo que se separava parte da água necessária para obtenção da umidade ótima da água utilizada na solução.

Realizando-se os ensaios de Proctor, pode-se perceber que a ordem de mistura influencia muito no produto obtido, sendo obrigatório a preparação antecipada do geopolímero e posterior mistura com o material fresado. Visando facilitar uma possível aplicação do geopolímero, realizaram-se tentativas de mistura de todos os materiais secos e posterior adição da solução

ativadora sem êxito. Zaharaki et al. (2010) ressaltava a importância da quantidade de água para perfeita mistura e ativação do material. Pode-se observar na Figura 36, as duas etapas de preparo do material, mistura do geopolímero com a solução e mistura do geopolímero com o material fresado.

Figura 36 - Mistura dos materiais para cimentação do fresado com geopolímero



Fonte: Próprio Autor (2017).

Os resultados encontrados para os dois testes realizados podem ser observados na Tabela 15. O teor de umidade foi obtido retirando-se amostras e secando-as em estufa durante 24 horas. Percebe-se que as densidades obtidas foram superiores aos valores obtidos para cimentação com cimento Portland (1,98 g/cm³). Objetivando-se eliminar a influência do grau de compactação, manteve-se mesma densidade para as misturas de geopolímero de cinza nos demais ensaios.

Após a realização do ensaio de Proctor iniciaram-se as tentativas de moldagem de corpos de prova para verificação da resistência à compressão. O objetivo era simplificar o processo de mistura e cura, visando sempre atestar a viabilidade de aplicação da técnica *in situ* e, não apenas, laboratorial.

Tabela 15 - Resultados do ensaio de Proctor para geopolímero de cinza

Umidade Ótima				
Ponto (% de silicato)	Teor solução	Teor umidade	Massa específica úmida (g/cm ³)	Massa específica seca (g/cm ³)
1 (20)	9,00%	5,3%	2,03	1,92
2 (20)	11,00%	6,4%	2,08	1,96
3 (20)	13,00%	7,5%	2,13	1,98
4 (20)	15,00%	7,7%	2,13	1,97
5 (20)	17,00%	7,5%	2,15	2,00
1 (30)	9,00%	5,3%	1,97	1,87
2 (30)	11,00%	6,4%	2,07	1,94
3 (30)	13,00%	6,7%	2,12	1,99
4 (30)	15,00%	6,8%	2,13	2,00
5 (30)	17,00%	6,8%	2,16	2,02

Fonte: Próprio Autor (2017).

Para que o objetivo de viabilizar a técnica pudesse ser alcançado, iniciou-se a moldagem de corpos de prova e cura a temperatura ambiente. O procedimento de moldagem seguiu a metodologia descrita para tratamento com cimento Portland e curaram-se os CPs dentro de um plástico fechado nas primeiras 24 horas. CPs com 7 dias (tempo de cura) e CPs com 28 dias não saíram do molde, aderindo nas laterais do cilindro e foram descartados. Esses corpos de prova foram moldados com teores de 45% de fresado, 20% de cinza, solução NaOH 10 mols e 30% de silicato. Utilizou-se inicialmente $\rho=1,98\text{g/cm}^3$ e quantidade de solução 13% em relação a massa seca. Tal tentativa mostra a dificuldade de utilização do geopolímero a temperatura ambiente.

Como os primeiros CPs não chegaram a sair do cilindro, realizaram-se algumas alterações na moldagem: utilizou-se filme plástico (DAVIDOVITS, 1982) no interior do cilindro, após a moldagem, colocaram-se os CPs em estufa a 50°C por 24 horas, desmoldaram-se os mesmos e armazenou-se todos à temperatura ambiente até a idade de rompimento, diminui-se a quantidade de solução para 12%. Outros critérios permaneceram: o teor de fresado de 45%, teor de cinza 20%, solução NaOH 10 mols e massa específica 1,98g/cm³. Variando teor de silicato: 0, 10, 20 e 30%. Foi possível encontrar com esses parâmetros valores de resistência à compressão superiores a 6 Mpa para o teor de 20% de silicato (norma trata de valores entre 2,1 e 2,5 Mpa para bases cimentadas). Não foram gerados gráficos ou análises destes resultados pois trata-se de valores referentes a 2 CPs por mistura, necessitando repetição dos testes para

uma análise estatística criteriosa das misturas. Os dados presentes na Tabela 16 referem-se a resistência aos 7 dias.

Tabela 16 - Valores médios de RCS para fresado com geopolímero de cinza volante

Silicato	Cinza	Resistência (MPa)
10,00%	10,00%	0,41
20,00%	10,00%	0,96
30,00%	10,00%	1,15
10,00%	20,00%	2,22
20,00%	20,00%	8,96
30,00%	20,00%	2,18
10,00%	30,00%	0,84
20,00%	30,00%	4,42

Fonte: Próprio Autor (2018).

Nota-se até o momento, que a temperatura de cura inicial aparenta ser significativa nos resultados, assim como esperado e relatado na bibliografia (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO; PUERTAS, 1999; WANG, S. D. et al., 1994; KIRSCHNER E HARMUTH, 2004; PINTO et al., 2002; PACHECO-TORGAL et al., 2008b; VAN JAARSVELD; VAN DEVENTER; LUKEY, 2002; PINTO, 2004; CRIADO; PALOMO; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, 2005). Testaram-se também todos os teores em nova tentativa de cimentação do material fresado com geopolímero a temperaturas de 40°C durante as primeiras 24 horas. Da mesma forma como a redução do teor de solução ativadora para 11% visando diminuir a umidade dos CPs, o que visualmente aparenta dificultar a desmoldagem. Os valores obtidos para esta tentativa não foram superiores a 0,85 MPa para uma densidade de 1,95g/cm³.

4.5. DURABILIDADE VIA ENSAIO DE MOLHAGEM E SECAGEM

O ensaio de molhagem e secagem foi realizado para as amostras de Cimento Potland e do RAP com geopolímero de cinza volante. No campo das análises realizadas, pode-se avaliar a perda de massa ao longo dos ciclos e, também, a influência do número de ciclos na resistência mecânica à compressão dos corpos de prova.

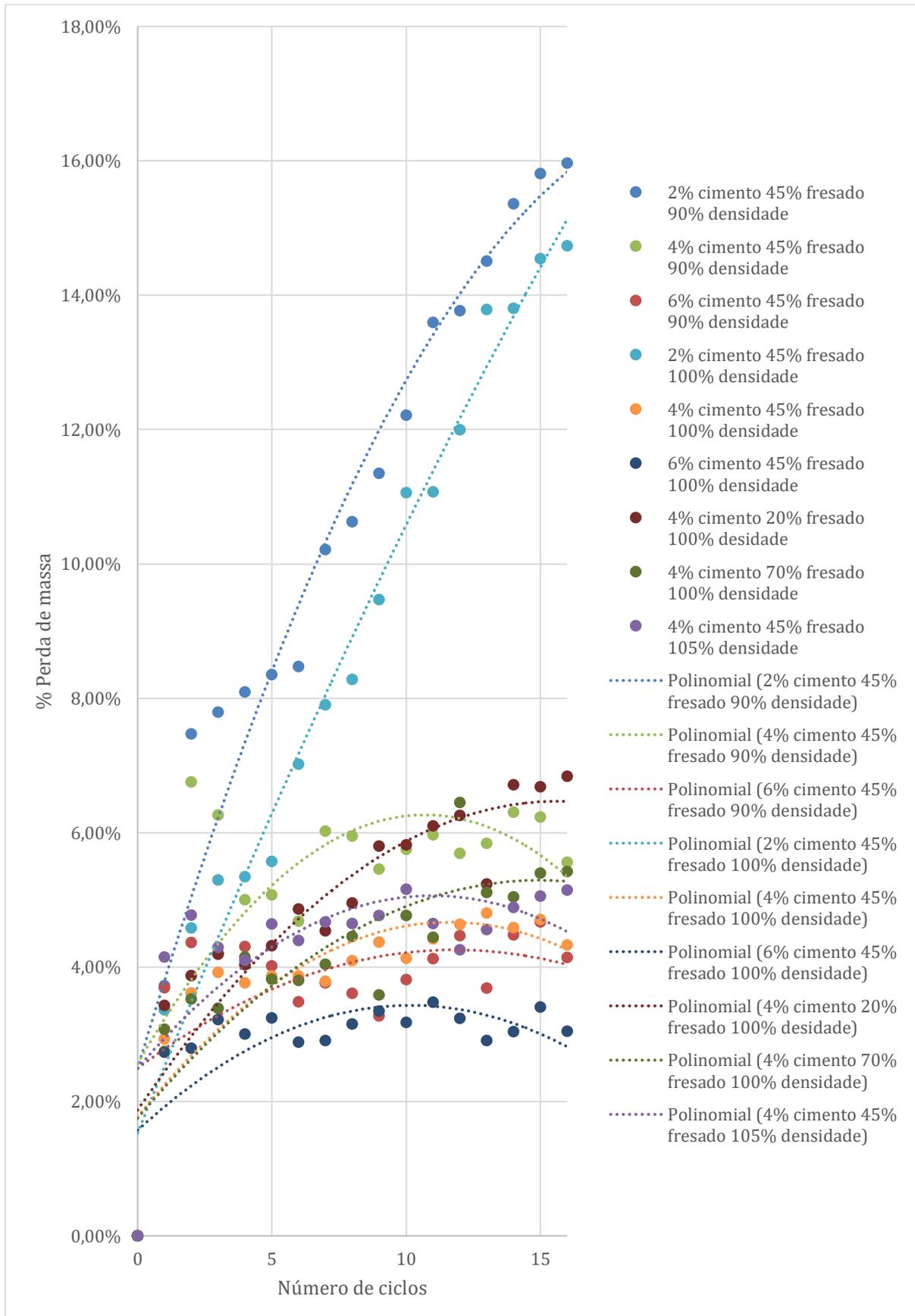
A perda de massa ocorreu com taxas entre 2% e 6% para todas as misturas. Apenas duas misturas com 2% de cimento atingiram patamares próximos a 15%. Ressalta-se também o fato de que essas misturas mais pobres evoluíram a uma taxa muito maior que as outras amostras.

Fato que pode ser observado nos corpos de prova que visivelmente desagregavam-se durante as escovações.

Independentemente do nível de compactação (90% ou 100%), o teor de cimento foi influente na perda de massa. Sendo que os teores de 6% de cimento foram os que apresentaram a menor perda de massa ao longo dos ciclos (sempre inferior a 5%). Pode-se concluir que a compactação mais uma vez reduziu as taxas e, também, os valores absolutos da perda de massa das misturas. Sendo que na média a compactação de 90% apresentou valores de perda superiores a 5% e não é possível descartar a igualdade de desempenho das misturas com 100% e 105% que apresentaram valores inferiores a 5% de perda.

Em relação ao teor de material fresado adicionado na mistura em relação ao material virgem, a mistura que apresentou a maior perda de massa foi a mistura com o menor teor de material fresado (20%). Portanto, fixando-se a quantidade de cimento (4%) e o nível de compactação (100%) os teores de 70% e 45% de material fresado não puderam ter a igualdade do seu desempenho descartada ao final de 16 ciclos. Todos os resultados podem ser observados na Figura 37.

Figura 37 – Perda de massa ao longo de ciclos de molhagem e secagem



Fonte: Próprio Autor (2022).

A resistência das amostras ao longo dos ciclos de molhagem e secagem pode ser observada na Figura 38. Inicialmente pode-se observar que a maioria dos teores apresentaram acréscimos de resistência no começo do processo de ciclagem. Atribui-se essa situação a cura lenta que ocorre após os períodos iniciais para o CPV-ARI utilizado. Aparentemente após o 8º ciclo, o comportamento estabiliza-se. Na presente pesquisa este momento fica aproximadamente a 40 dias após a moldagem dos corpos de prova. Utilizando esse viés, tal metodologia permitiria avaliar o provável decréscimo de resistência para tempos de cura elevadas e não como um ensaio laboratorial acelerado para avaliar durabilidade.

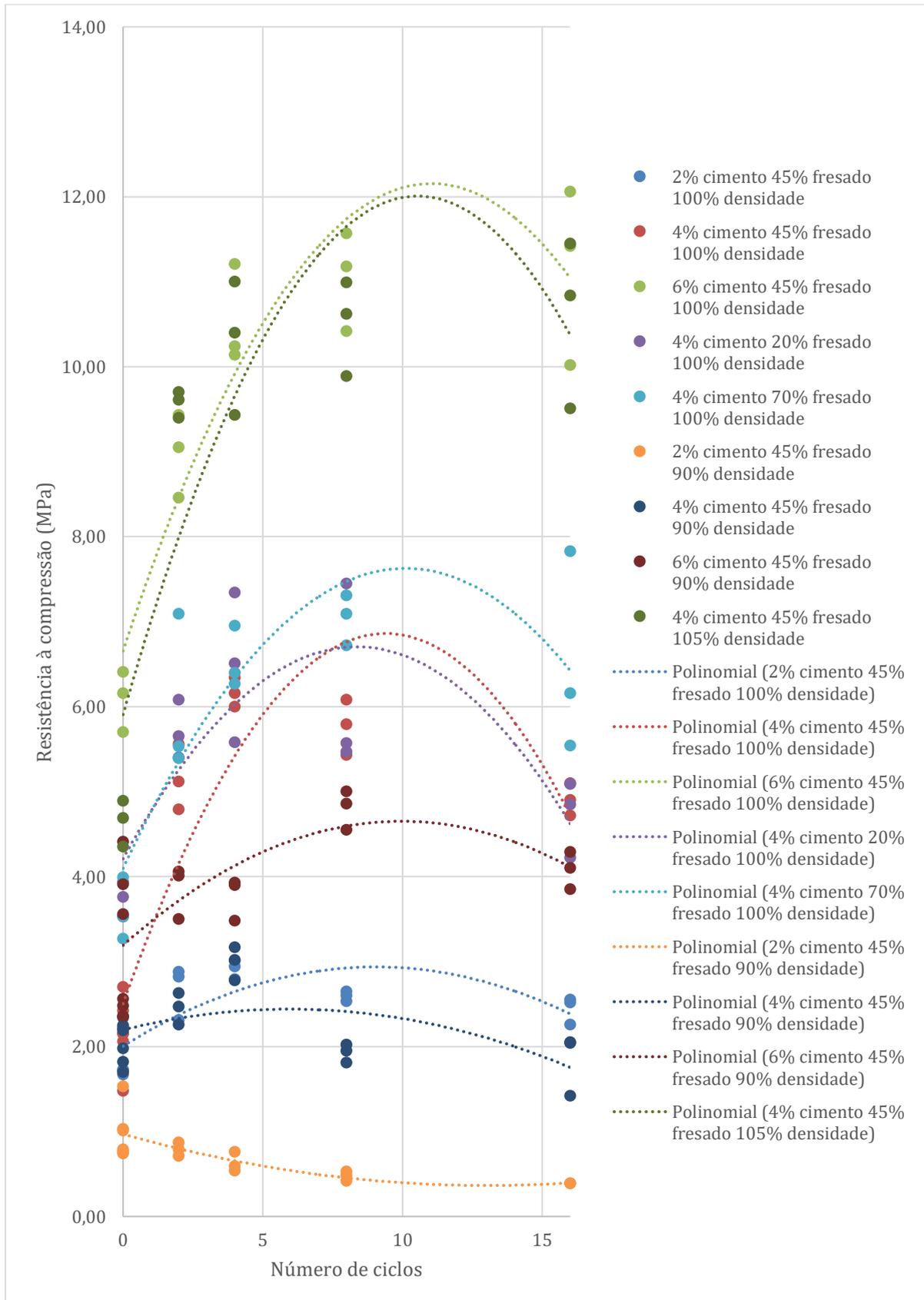
Foram testadas duas densidades secas para o teor de material fresado de 45%. O valor de 100% corresponde a uma densidade seca de aproximadamente $1,95\text{g/cm}^3$ e o valor de 90% corpos de prova moldados com aproximadamente $1,75\text{g/cm}^3$. Comparando-se ambos os resultados para o mesmo teor de cimento, os valores de resistência chegam a diminuir 50% e existe decréscimo de resistência direto para os teores de 2% e 4%. Portanto, pode-se sugerir que toda e qualquer cimentação de base requer cuidado e controle durante o processo de compactação. Comportamento semelhante ao encontrado por Pasche et al. (2018).

Utilizando-se o presente estudo para verificar a viabilidade do uso de cimentações em bases, chega-se a conclusão que apenas os teores de 2% de cimento e também o teor de 4% com baixa compactação (90%) não poderiam ser utilizados após os ciclos de molhagem e secagem.

Comparando-se os ensaios realizados para o mesmo teor de material fresado (45%) e variando-se a quantidade de cimento (2%, 4% e 6%), também percebe-se como este fator influencia, sendo que quanto maior o teor de cimento maior o ganho inicial de resistência com o processo de molhagem e secagem.

Outra situação encontrada que pode ser confirmada é a impossibilidade de descartar a igualdade no comportamento dos materiais quando fixa-se o teor de cimento (4%) e varia-se a quantidade de material fresado.

Figura 38 – Resistência à compressão ao longo de ciclos de molhagem e secagem



Fonte: Próprio Autor (2022).

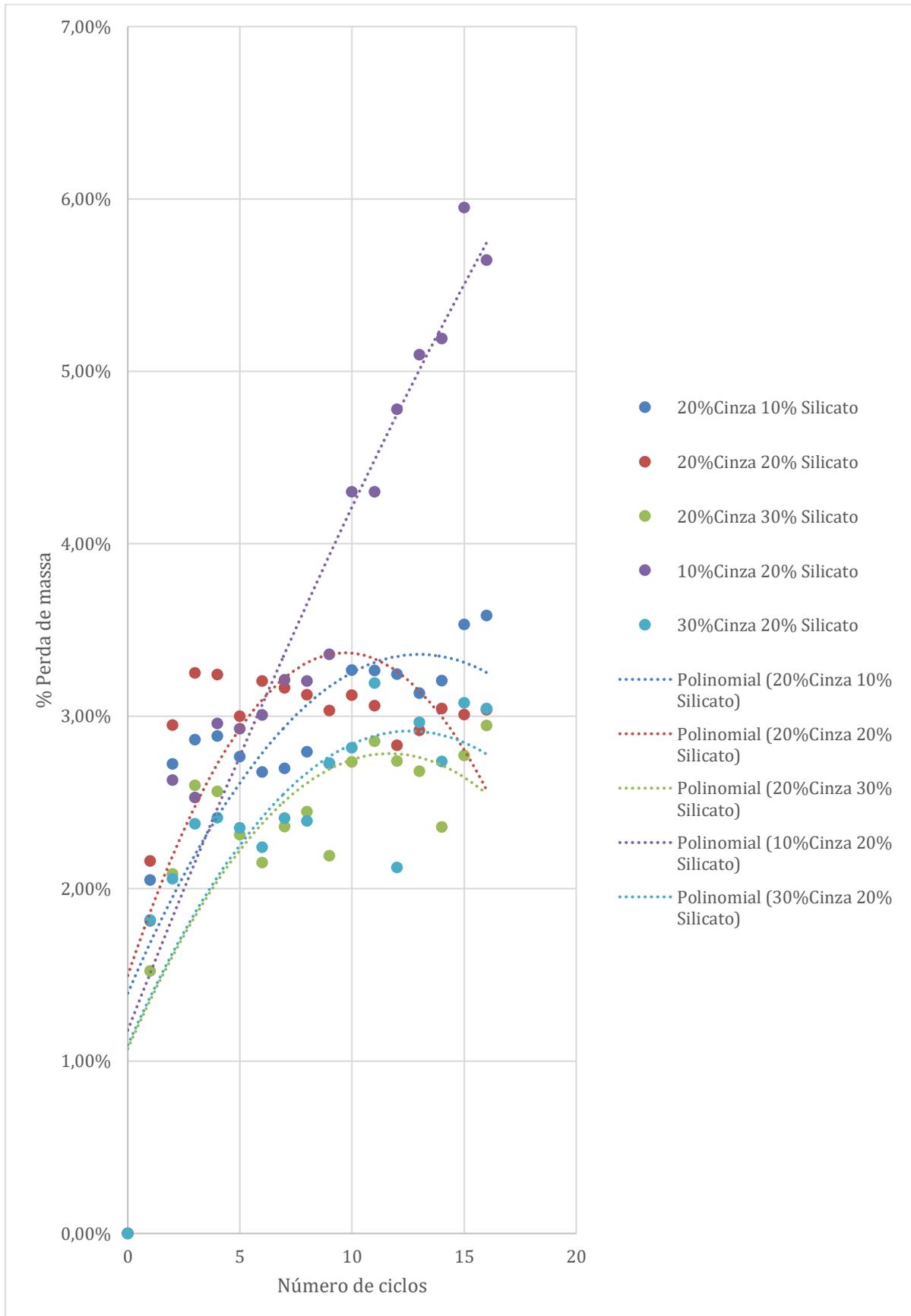
De maneira semelhante os resultados de perda de massa para o RAP cimentado com geopolímero podem ser observados na Figura 39.

Para a grande maioria dos teores obteve-se valores inferiores aos observados para misturas de cimento Portland (abaixo de 4% de perda de massa), porém, a mistura com 10% de cinza e 20% de silicato apresentou um comportamento divergente, chegando a 6% de perda de massa ao final dos 16 ciclos. Dentro das misturas também apresentou-se um comportamento semelhante quanto a taxa de perda de massa, sendo que todas as misturas apresentavam perda de massa ao início das ciclagens, praticamente estabilizando-se após o 5º ciclo.

Atribui-se a maior perda de massa do teor de 10% de cinza ao fato de possivelmente existir baixa cimentação, sendo que os valores superiores de 20% e 30% de cinza para o mesmo teor de silicato (20%) não apresentaram diferença significativa entre eles. Desta forma, pode-se entender como provável que exista um teor ótimo de cinza que apresentaria o melhor desempenho quanto a perda de massa.

Outra conclusão do presente estudo foi sobre o teor de silicato (fixando-se o teor de cinza em 20%), quanto maior o teor de silicato adicionado na mistura, menor foi a perda de massa. Sendo que no caso dos teores de 10% e 20% não foi possível descartar a hipótese de igualdade dos resultados. No caso do teor de silicato de 30% os valores de perda de massa foram 1 ponto percentual menor do que a mistura de 10% de silicato apresentou.

Figura 39 – Perda de massa ao longo de ciclos para RAP com geopolímero



Fonte: Próprio Autor (2022).

Referente a avaliação da resistência ao longo dos ciclos de molhagem e secagem para o RAP cimentado com geopolímero, obteve-se um comportamento semelhante ao observado para Cimento Portland. Uma ressalva que deve ser realizada antes da apresentação dos resultados é referente a ordem de grandeza dos mesmos. Devido a pandemia de COVID-19 os ensaios de molhagem e secagem foram realizados nas amostras em tempo de cura diferente ao de cimento Portland. Sendo que no momento de ruptura dos corpos de prova, todos apresentavam mais de 365 dias de cura. Comparando-se a resistência obtida anteriormente nas mesmas dosagens, percebe-se que o material tem um ganho de resistência lento, porém, bastante significativo ao longo do tempo (cerca de 3 vezes o valor obtido em 7 dias de cura).

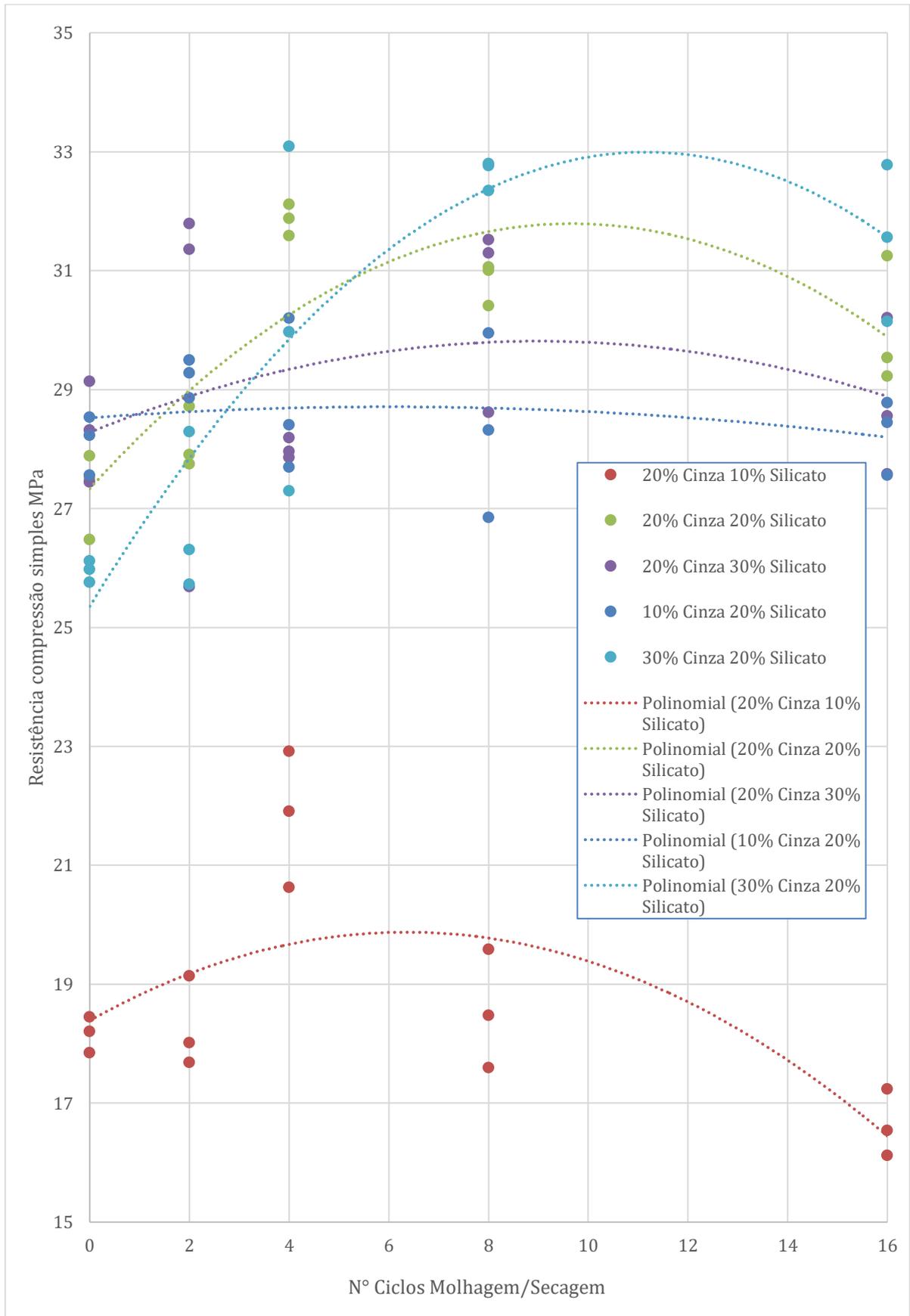
Pode-se considerar que as reações de geopolimerização aconteceram durante este longo período de cura, mesmo a temperatura ambiente. Este resultado também foi encontrado na bibliografia (AMRAN, et. al. 2021). Tal característica pode ser considerada benéfica para a aplicação aqui proposta, sendo benéfica para base de pavimentos, esperando-se uma manutenção do MR ao longo do tempo.

As resistências mecânicas à compressão normalmente aumentam com o decorrer dos ciclos e depois estabilizam-se e/ou apresentam uma pequena queda, o que estatisticamente não mostrou significância. Comparando-se os valores de resistência para um mesmo teor de silicato (20%) chega-se à conclusão que o teor de cinza influenciou nos resultados, sendo que o teor de 30% apresentou valores de resistência acima de 31MPa, mesmo após a ciclagem, sendo este o melhor desempenho encontrado. De maneira oposta o teor de 10% de cinza acabou apresentando o pior desempenho entre as misturas, tendo resistência em média 10% abaixo deste referencial. A mistura com 20% de cinza ficou em um patamar intermediário (30MPa). Ressalta-se que estatisticamente a igualdade destes resultados não pôde ser descartada.

De maneira análoga, fixando-se o teor de cinza (20%) e variando-se os teores de silicato obteve-se resultados mais significativos. A mistura com 10% de silicato apresentou o pior desempenho em relação a todas as misturas (média de 18MPa). Os valores de 20% de silicato e 30% de silicato não tiveram estatisticamente resultados diferentes.

Concluindo-se o presente comparativo, o objetivo destes testes era avaliar a perda de massa e decréscimo de resistência das amostras ao longo dos ciclos. O fato encontrado é que de maneira geral, os ciclos de molhagem e secagem para materiais cimentados (seja com Cimento Portland ou geopolímero) parecem melhorar o desempenho do material. Mesmo quando visualmente os corpos de prova estavam danificados devido ao processo de ciclagem com escovação, este fator físico não prejudicou de maneira significativa os resultados de resistência.

Figura 40 – Resistência mecânica ao longo de ciclos para RAP com geopolímero



Fonte: Próprio Autor (2022).

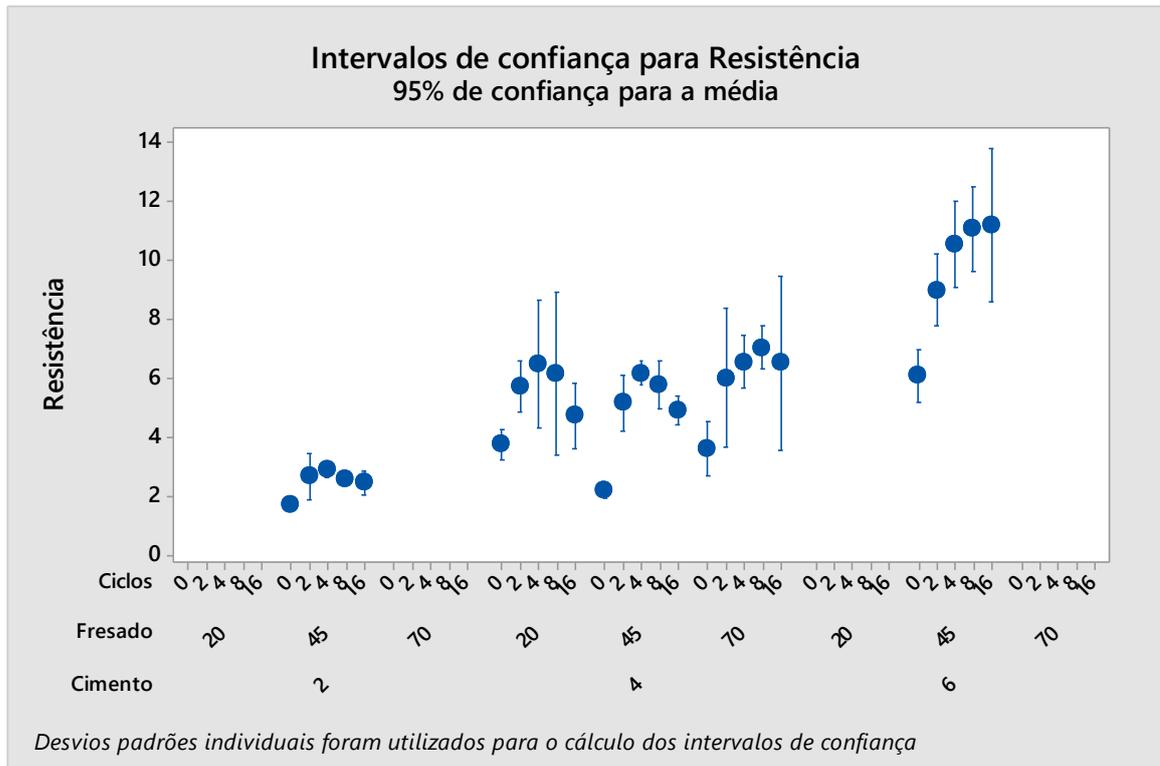
De maneira extensiva, foram realizados testes estatísticos como ANOVA e MONOVA (estes resultados estatísticos encontram-se no Anexo A deste documento) para as combinações de resultados supracitados. Nas Figura 41 e 42 é possível observar a síntese destas avaliações com o uso dos diagramas de caixa para as variações de resistência mecânica. Optou-se pelos gráficos de dispersão anteriores para os comentários realizados visto a melhor apresentação dos dados.

As Figuras 43 e 44 apresentam os diagramas matriciais dos dados categorizados. Pode-se concluir estatisticamente que:

- O teor de Cimento Portland utilizado aumenta a resistência mecânica das amostras;
- O teor de material fresado mostra-se irrelevante para os resultados de resistência;
- Durante a ciclagem com Cimento Portland obteve-se um acréscimo inicial de resistência devido a cura tardia (após 7 dias), estabilização e pequeno decréscimo de resistência;
- O teor de silicato utilizado nas misturas de geopolímero teve um aumento médio de aproximadamente 30% comparando-se a mistura de 10% e 20%;
- O teor de silicato de 30% obteve resistência semelhante a mistura de 20%;
- O teor de geopolímero adicionado (cinza volante) mostrou-se pouco significativo nos valores de resistência;
- Durante a ciclagem com geopolímero obteve-se um acréscimo inicial de resistência devido ao lento ganho de resistência deste material;
- Se fossem excluídos do gráfico os dados de 10% de silicato (todos apresentaram resultados de resistência muito abaixo dos outros teores), conclui-se de maneira geral, que para o geopolímero os primeiros ciclos aumentaram as resistências e os últimos já por alta perda de massa diminuíram;

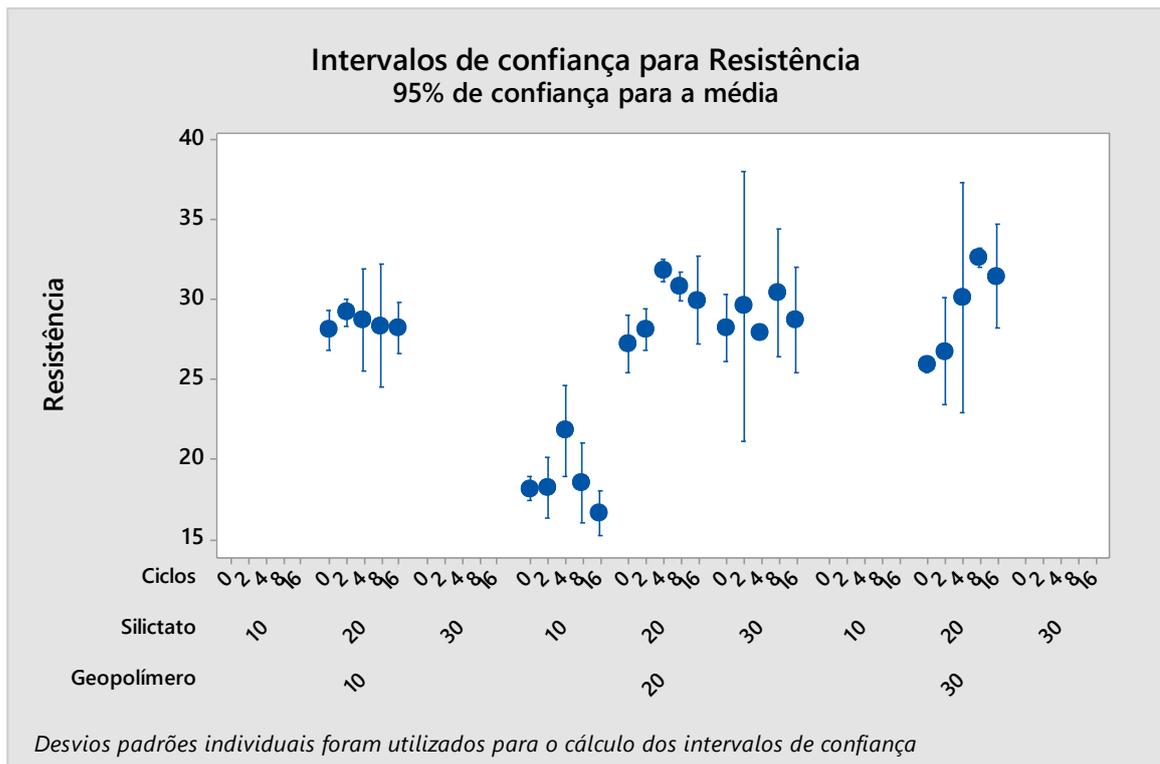
De maneira geral ambas as cimentações se comportaram de maneira análoga. Porém, no caso do geopolímero, de maneira mais significativa, os ciclos de molhagem e secagem aumentaram a resistência do material, funcionando mais como um tipo de cura térmica do que mecanismos de degradação do material.

Figura 41 – Síntese da análise estatística da resistência para Cimento Portland (MPa)



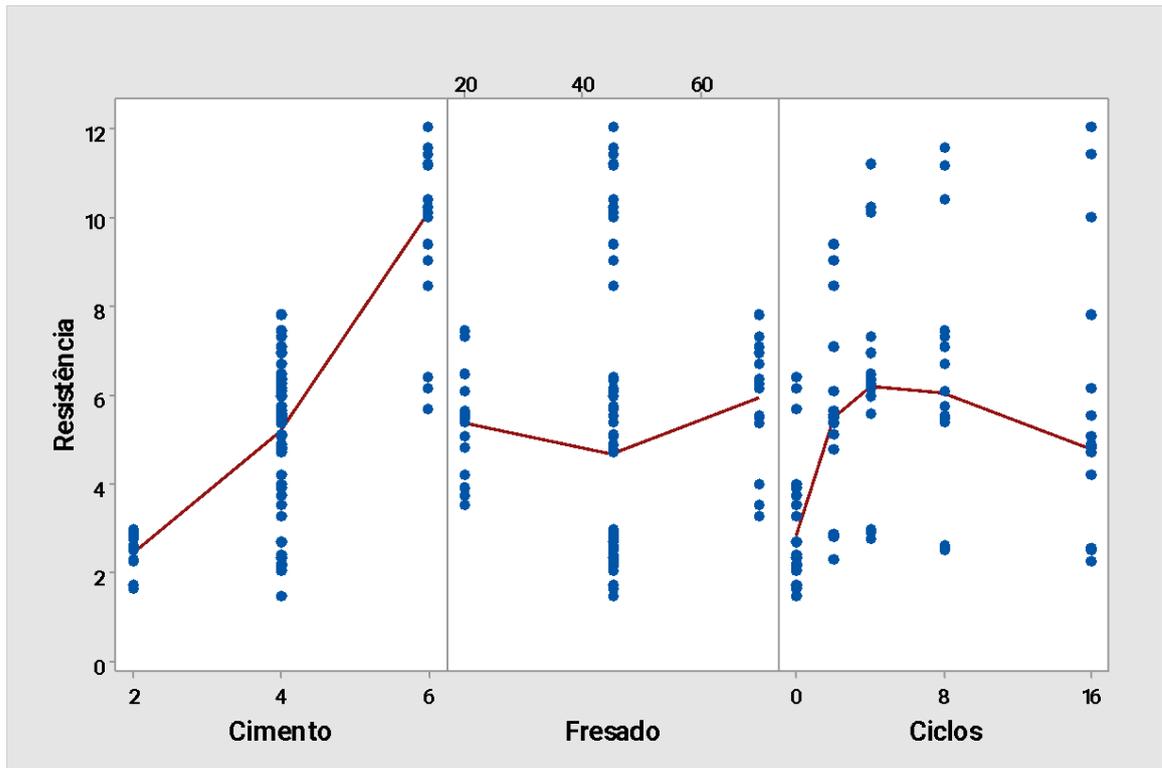
Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 42 – Síntese estatística dos resultados de resistência geopolímero (MPa)



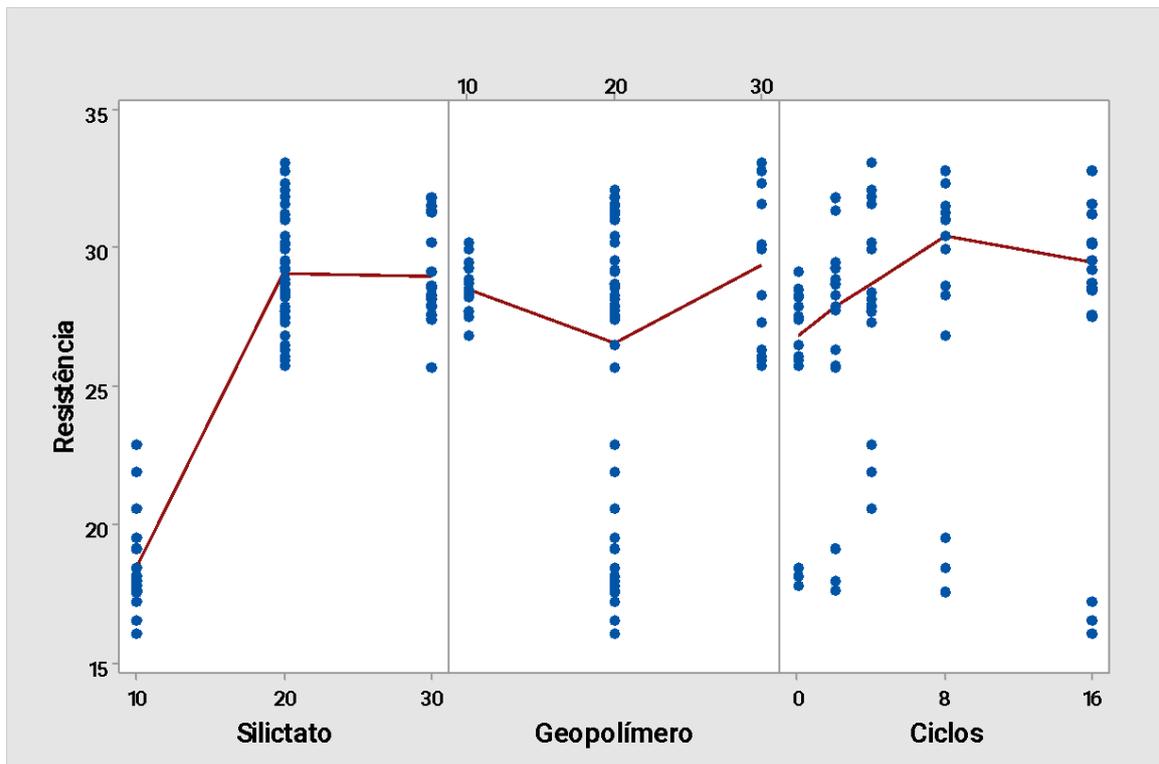
Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 43 – Diagrama matricial dos resultados categorizados de cimento (MPa)



Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 44 – Diagrama matricial dos resultados categorizados de geopolímero (MPa)

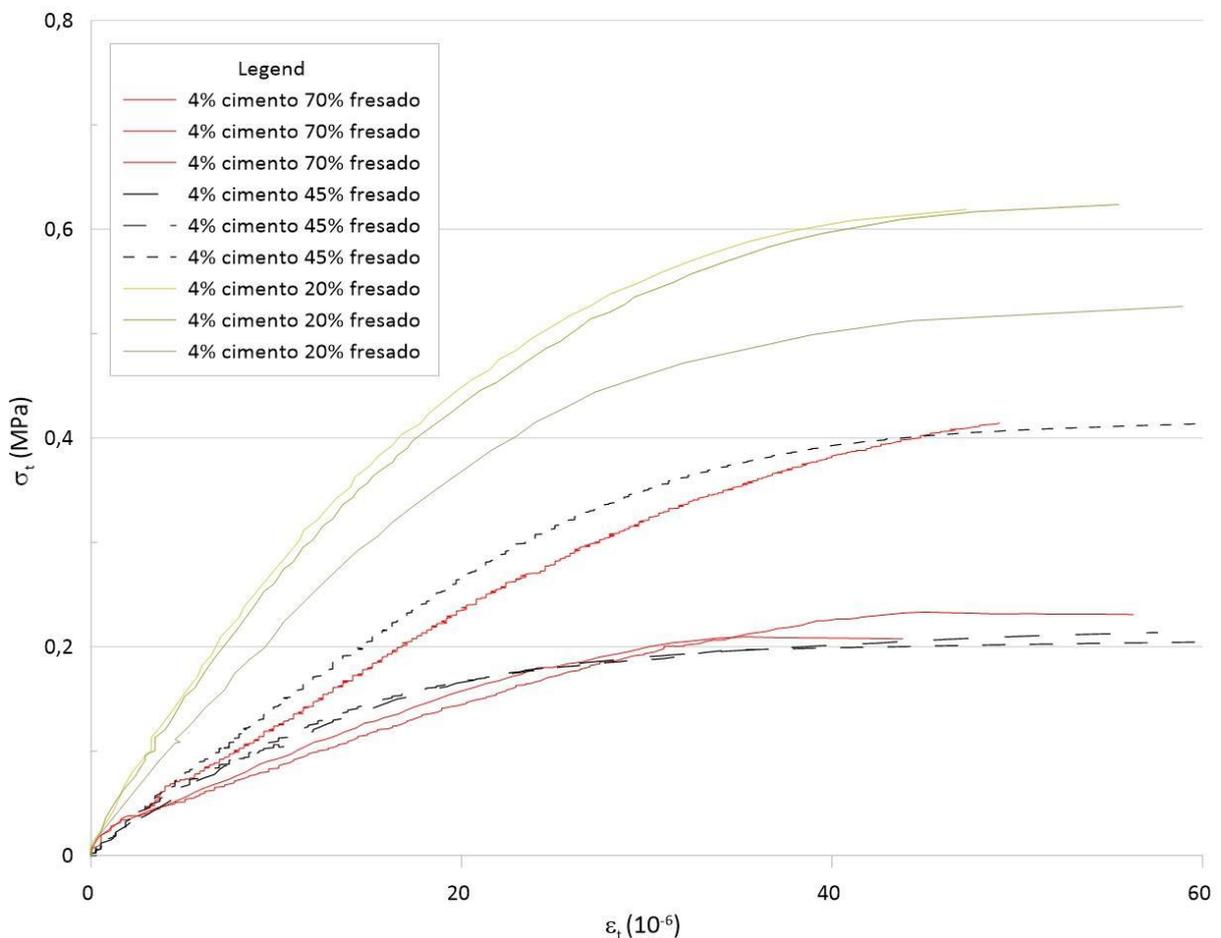


Fonte: Próprio Autor (2022).

4.6. TRAÇÃO DA FLEXÃO E MÓDULO ESTÁTICO

Seguindo o procedimento metodológico, realizaram os ensaios de módulo estático para cimento e para geopolímero. A Figura 45 apresenta os resultados para cimento Portland. Observa-se que o aumento do teor de material fresado levou a uma diminuição dos valores absolutos máximos obtidos antes da ruptura, sendo que para o melhor teor (20%) foram obtidos resultados superiores a 0,6 MPa. Da mesma maneira houve alteração na inclinação das curvas, o que representa um decréscimo da rigidez com aumento do teor de material fresado na mistura. Conclui-se que o ligante presente no material fresado parece alterar o comportamento das misturas, o que poderia explicar o decréscimo da rigidez.

Figura 45 – Resultados de módulo estático para cimento Portland

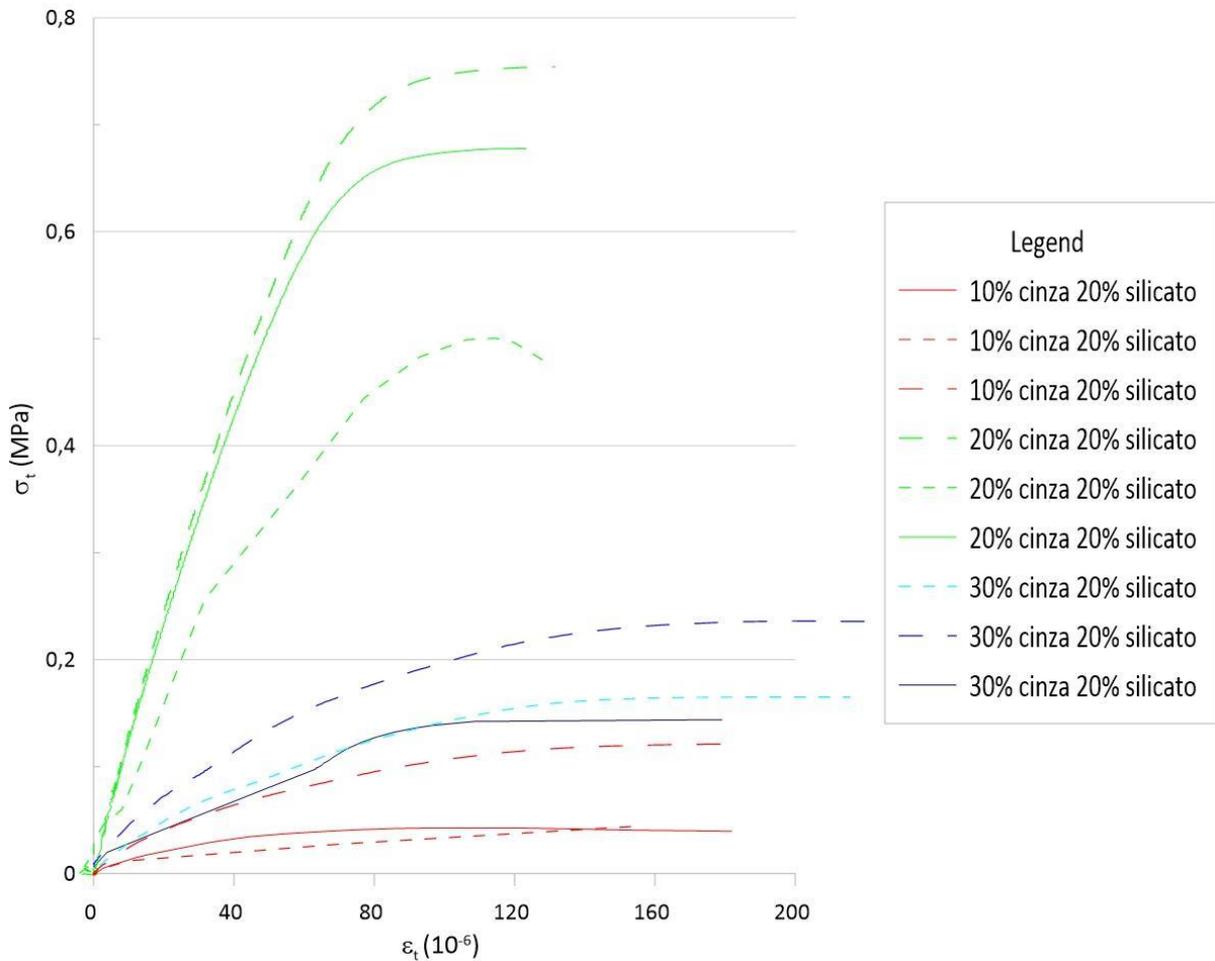


Fonte: Próprio Autor (2022).

A Figura 2 apresenta os resultados para geopolímero. Observa-se que o aumento do teor de geopolímero na mistura gerou um aumento de resistências absolutas, sendo que o limite de

20% de cinza está bem definido. Da mesma maneira como para cimento Portland obtiveram-se resultados absolutos superiores a 0,6 Mpa. Também houve alteração na inclinação das curvas, o que representa um decréscimo da rigidez com os teores de 10% e 30% de cinza nas misturas.

Figura 46 – Resultados de módulo estático para geopolímero



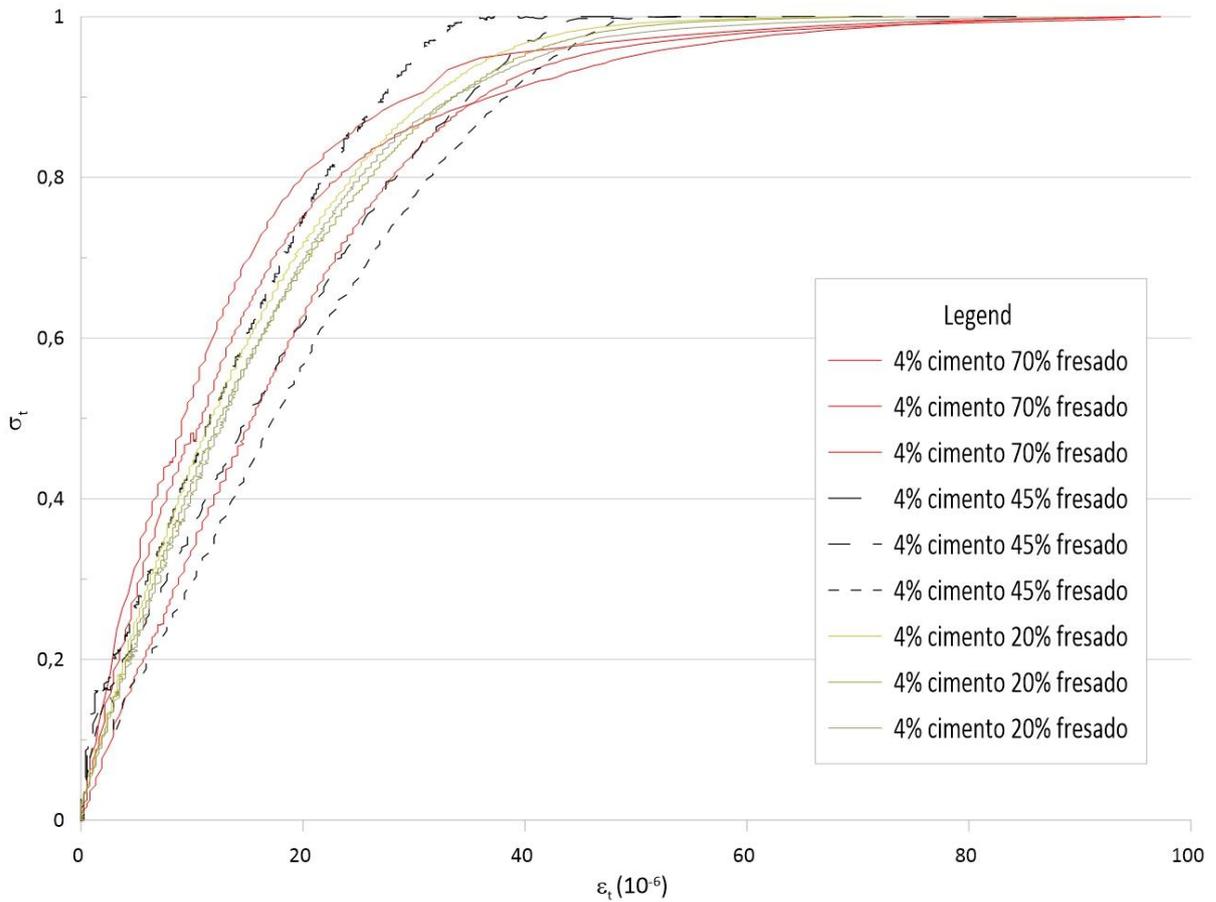
Fonte: Próprio Autor (2022).

Visando viabilizar a comparação entre ambas as cimentações e também avaliar de maneira mais precisa as mudanças na rigidez das misturas, optou-se por normalizar todos os resultados. A Figura 47 apresenta os resultados para cimento Portland. Observando-se os dados, podemos constatar as seguintes evidências:

- A rigidez das misturas obtidas a partir dos ensaios de flexo tração em 4 pontos indicam que o acréscimo do teor de fresado resulta em uma redução da rigidez inicial;
- A rigidez para amostras com maiores teores de fresado indicam uma predominância não linear do comportamento;

- A adição de maiores teores de fresado promove a queda rápida do módulo normalizado.
- Tal comportamento também foi observado para CBR no trabalho de Guthrie et. Al. (2007) que avaliou mais variáveis correlatas, como umidade;

Figura 47 – Resultados normalizados de tensão de ruptura para cimento Portland

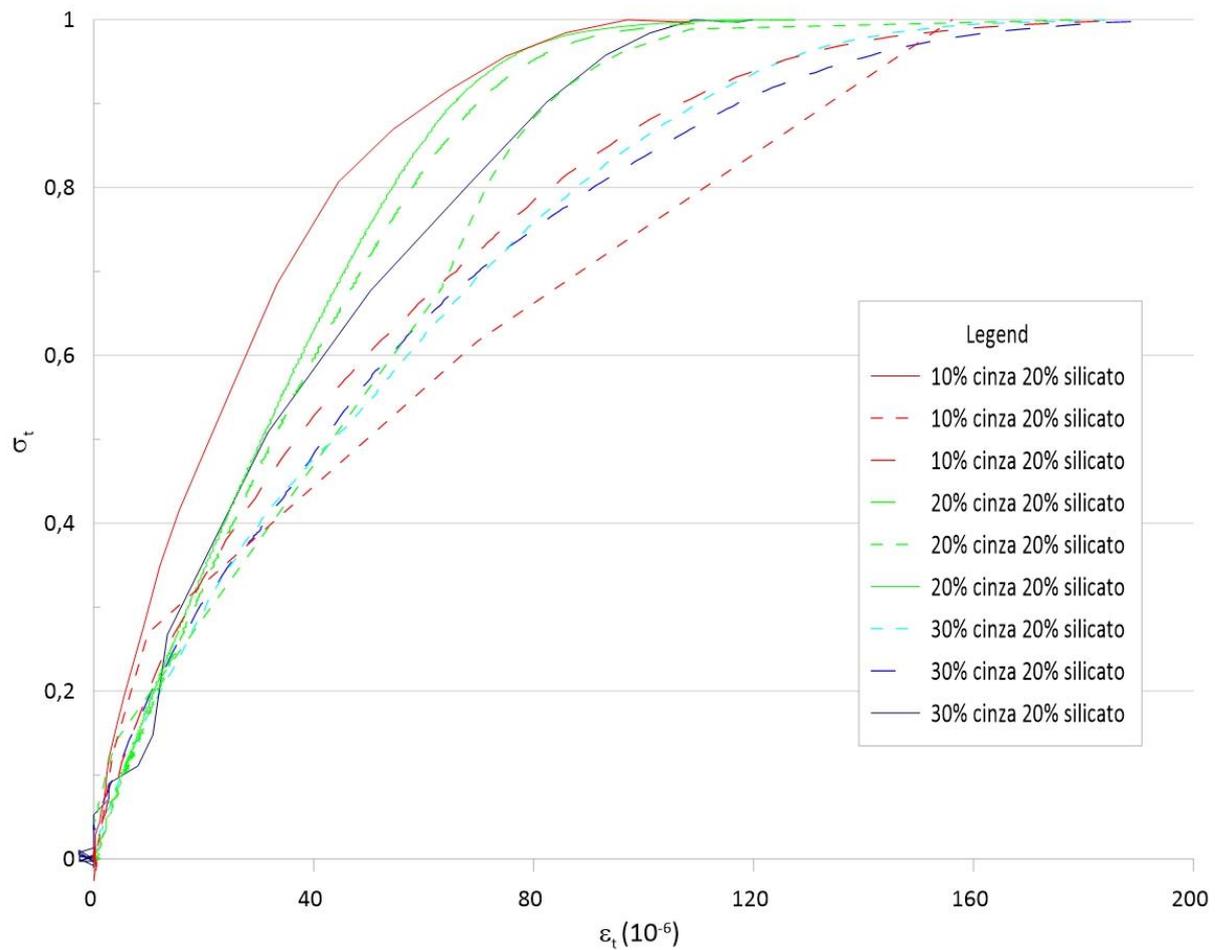


Fonte: Próprio Autor (2022).

A Figura 48 apresenta os resultados para geopolímero. Observando-se os dados, podemos constatar as seguintes evidências:

- A tensão de ruptura normalizada parece ter forte influência da relação cinza/silicato, tal que valores maiores desta relação indicam aparente queda do módulo a tração normalizado;
- Observa-se que o teor de 10% cinza não foi um teor muito homogêneo, as baixas resistências relatadas prejudicam a própria realização do ensaio sendo que nas relações de tensão maiores, o resistiu a poucos ciclos.

Figura 48 – Resultados normalizados de tensão de ruptura para geopolímero

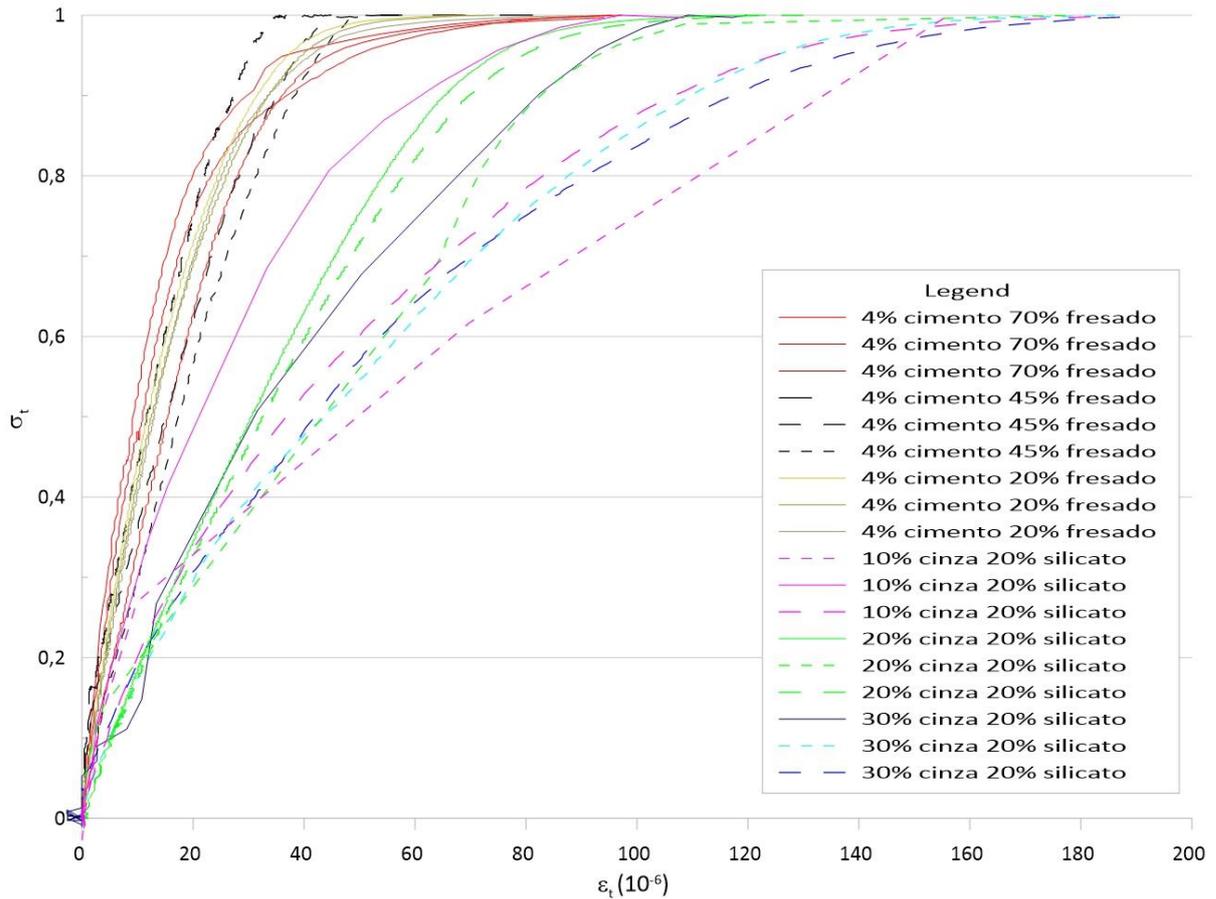


Fonte: Próprio Autor (2022).

A Figura 49 apresenta os resultados comparativos para módulo estático entre as misturas de geopolímero e cimento Portland. Observando-se os dados, podemos constatar as seguintes evidências:

- A rigidez normalizada permite que se compare as duas tentativas de cimentação;
- As amostras de cimento Portland apresentam rigidez elevada em relação as amostras com ativação alcalina;
- Comparando-se a amostra com 45% de fresado e as amostras de cinza volante, a ruptura das amostras de geopolímero apresenta um comportamento significativamente mais dúctil que as amostras de cimento Portland.

Figura 49 – Resultados normalizados de tensão de ruptura comparativo



Fonte: Próprio Autor (2022).

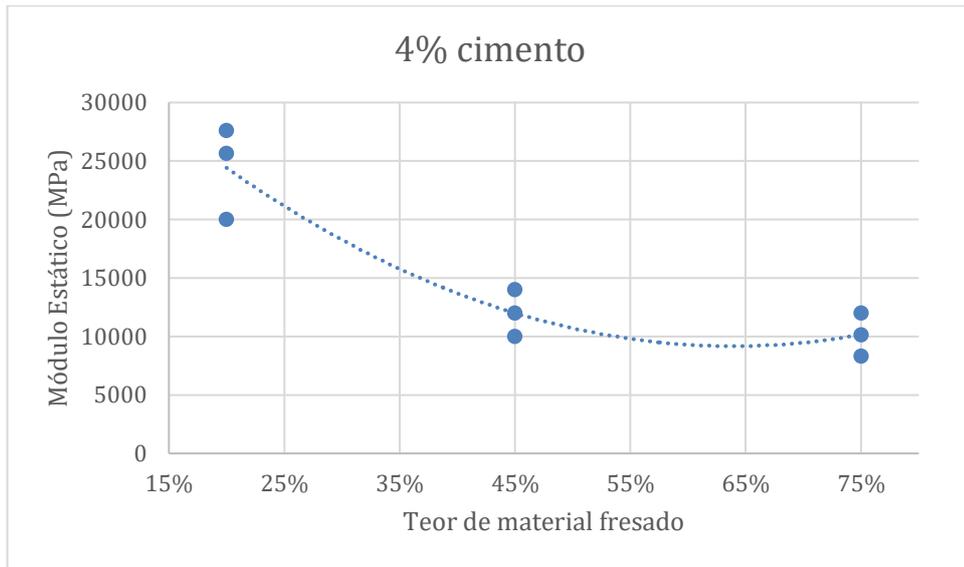
4.7. Módulo de Resiliência e Fadiga

Para o cálculo do módulo de resiliência foram traçadas retas que caracterizavam a inclinação das curvas obtidas no ensaio de carregamento estático. Desta forma foi possível definir a relação entre a tensão de ruptura e as deformações obtidas. Para calcular o módulo estático de cada uma dessas misturas foram utilizadas as figuras anteriores. As Figuras 50 e 51 apresentam os resultados obtidos.

A mistura que apresentou o maior módulo estático foi a mistura com 4% de cimento e 20% de material fresado. O que pode ser atribuído a grande presença de material virgem e baixa presença de ligante. Assim como, dentro das amostras de cimento a que apresentou o menor valor foi a de 75% de material fresado. Resposta atribuída ao maior teor de ligante residual.

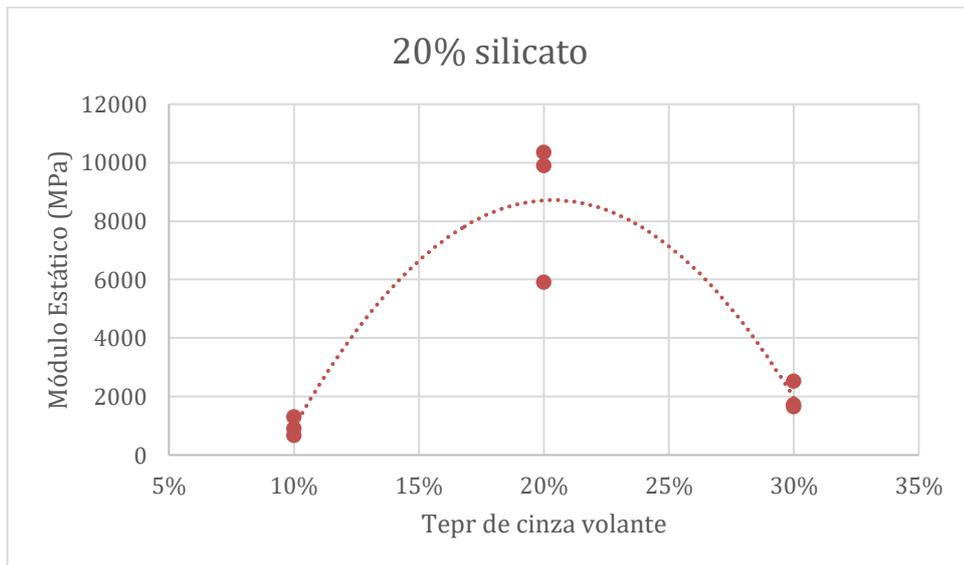
Nas amostras ensaiadas com cimentação de geopolímero encontraram-se valores inferiores aos obtidos para cimento Portland. Porém, no caso da amostra com 20% de cinza, chaga-se a valores médios de 10.000 MPa, semelhantes aos obtidos em cimento Portland. Caracterizando desta forma uma característica mais dúctil ao material.

Figura 50 – Resultados módulo estático



Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 51 – Resultados módulo estático

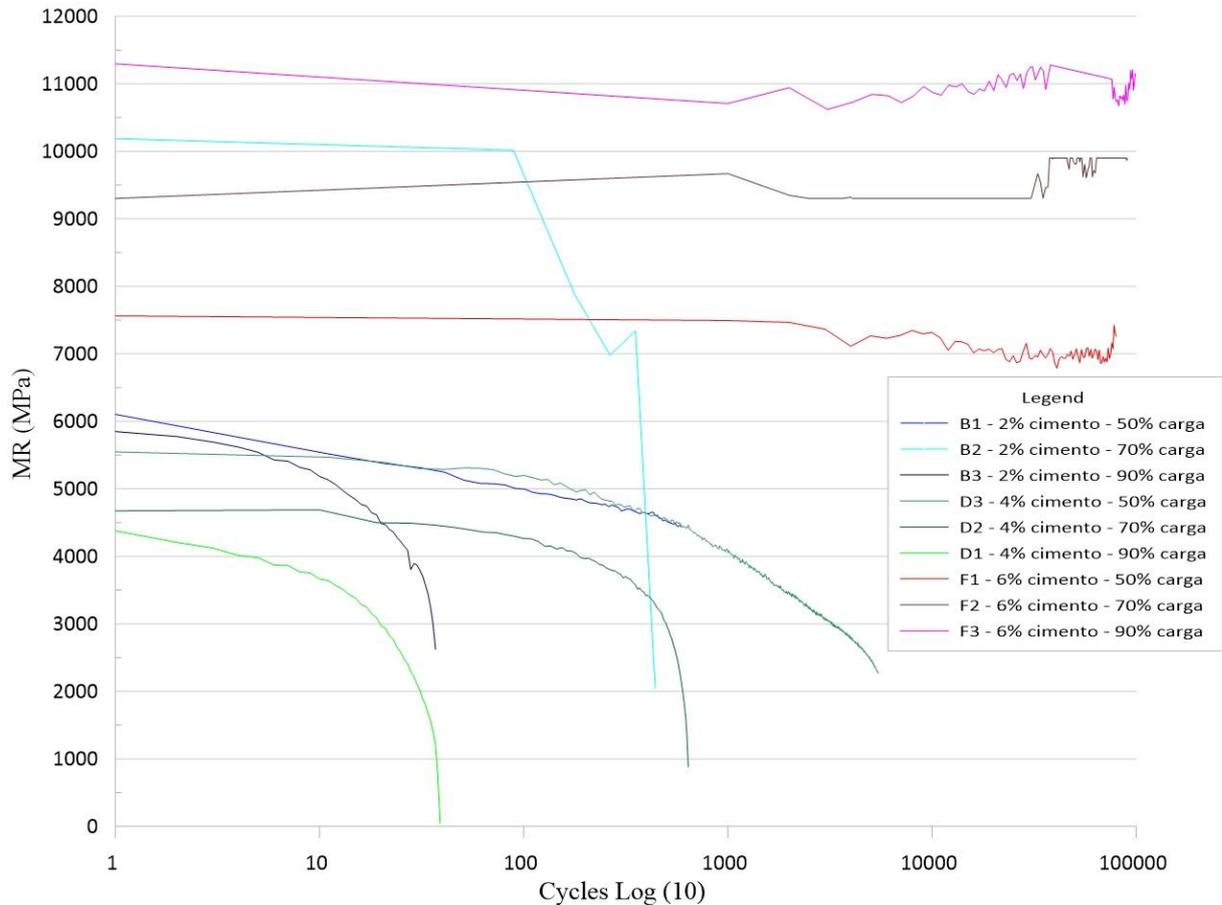


Fonte: Próprio Autor (2022).

A Figura 50 apresenta os resultados obtidos no equipamento de carregamentos cíclicos. Observa-se que mesmo com razões $\sigma/\sigma_{t\text{ rup}}$ elevadas não foi possível observar a ruptura das amostras após um período de 100000 ciclos para as amostras com 6% de adição de cimento Portland. Comparando-se com o trabalho desenvolvido por Ghanizadeh et. Al (2018) para carregamentos estáticos, também se observou um decréscimo de módulo aumentando-se os teores de material fresado na mistura. Ressalta-se que o corpo de prova da mistura B2 ficou

fora da realidade esperada, acredita-se que o problema tenha sido causado por erros durante a moldagem. De maneira geral devido ao excessivo número de linhas obtidas com ciclagens longas, foram reduzidos os números de pontos para melhor observação gráfica.

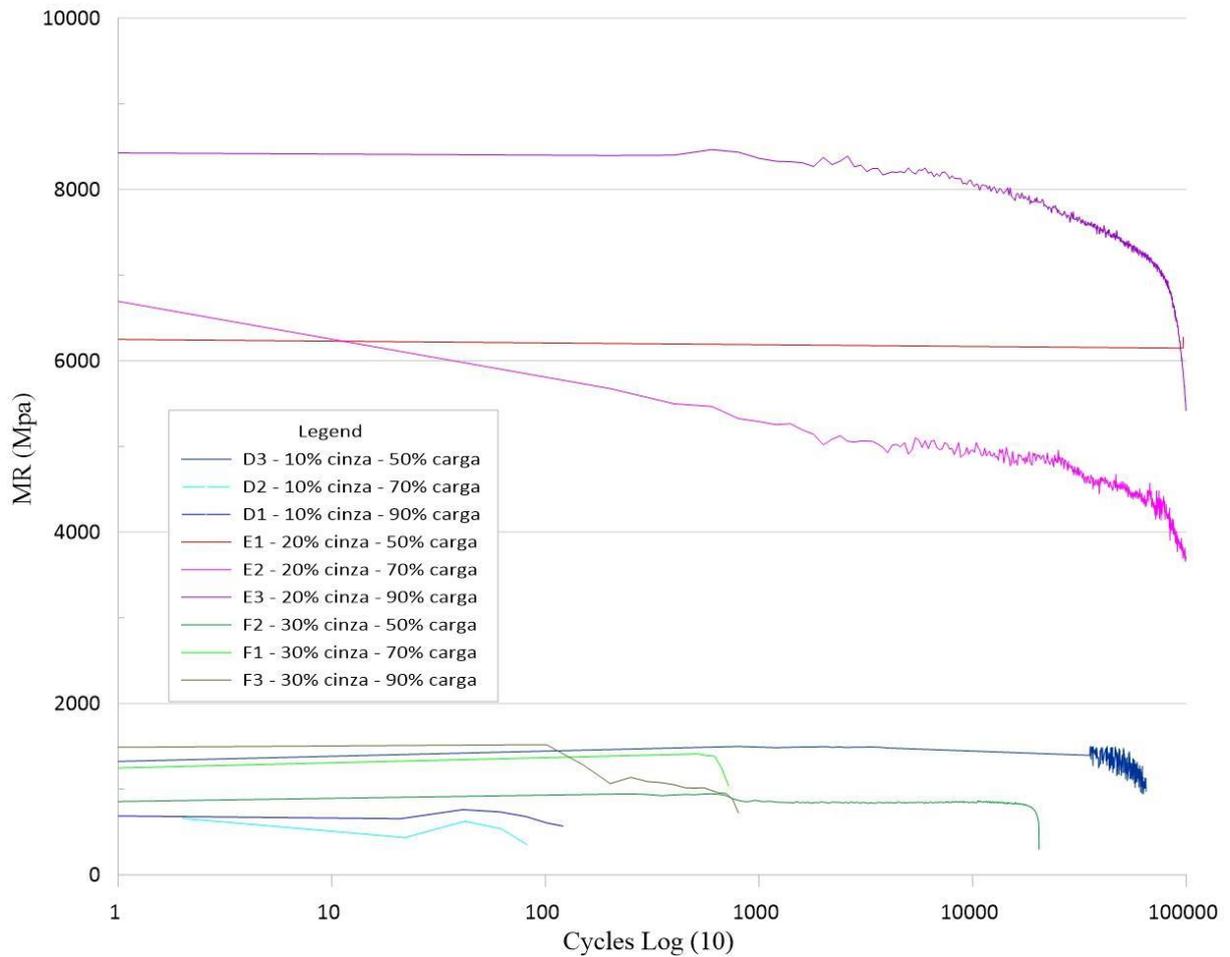
Figura 52 – Resultados de fadiga para cimento Portland



Fonte: Próprio Autor (2022).

A Figura 51 apresenta os resultados obtidos para as misturas de geopolímero. Ressalta-se que as misturas com 50% de carga em relação a tensão de ruptura acabaram não rompendo. Sendo que a melhor mistura obtida foi a de 20% de cinza. Os teores de 10% e 30% não apresentaram diferenças muito significativas. Assim como no trabalho desenvolvido por Jalu et Al. (2020) os valores obtidos para o MR ficaram na casa dos 8000 Mpa na mistura de 20% de cinza, sendo que as misturas de 10% e 30% de cinza não conseguiram alcançar estes valores absolutos. Ressalta-se que o referido trabalho não avaliou relações de tensão superiores a 40% da carga total de ruptura.

Figura 53 – Resultados de fadiga para geopolímero



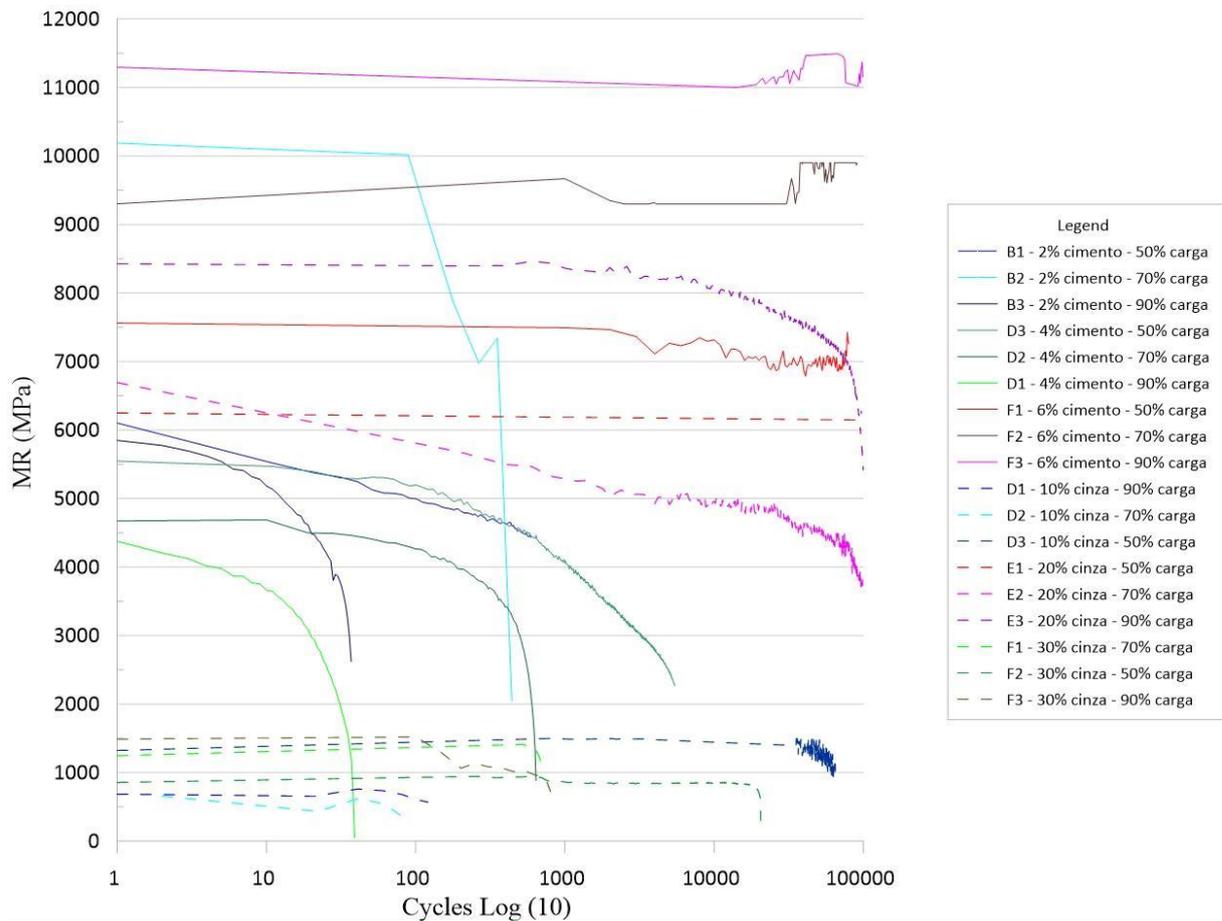
Fonte: Próprio Autor (2022).

Também foi avaliado de maneira comparativa o comportamento entre os corpos de prova de cimento e geopolímero. A Figura 52 apresenta os resultados das várias misturas estudadas. Pode-se concluir que:

- De maneira geral as amostras com baixo teor de cinza apresentam comportamento e valores de MR menores que para misturas de cimento;
- Teores de 20% de cinza apresentam comportamento semelhante as misturas feitas com cimento Portland;
- A maioria das misturas que foram ensaiadas com 50% de carga acabaram não rompendo dentro de um horizonte de 1.000.000 de ciclos;
- A mistura de 20% de cinza apresenta um resultados aparentemente dúctil, sendo que seu módulo acaba decrescendo de maneira suave até o momento de ruptura;

- As misturas de cimento normalmente têm um comportamento frágil, sendo que seu módulo decresce consideravelmente ao final da vida de fadiga das misturas;
- Quanto maior o teor de cimento na mistura, maiores foram os valores absolutos observados para MR, diferente do que ocorre com geopolímero;

Figura 54 – Resultados de fadiga comparativo



Fonte: Próprio Autor (2022).

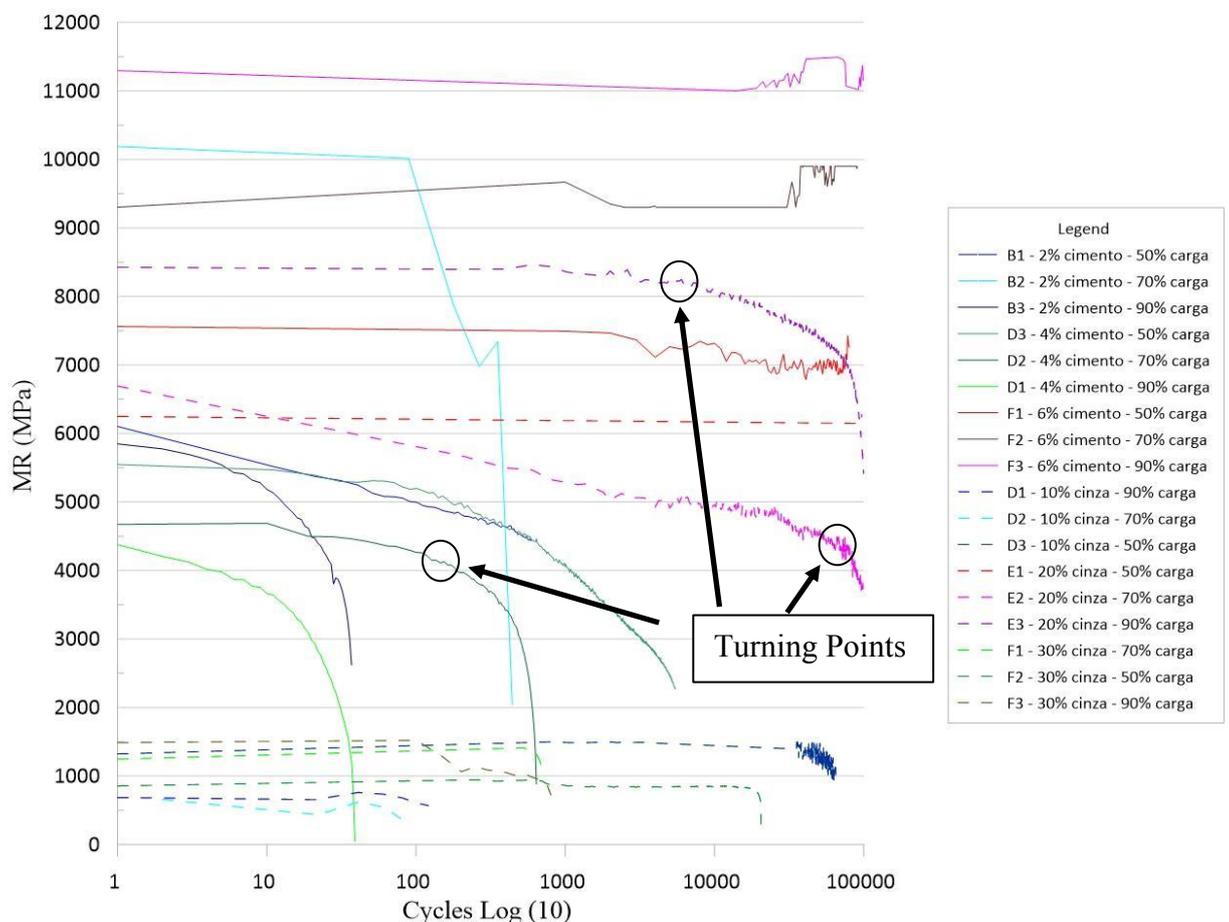
Utilizando-se o gráfico anterior para que de maneira gráfica fosse definido os pontos onde as misturas iniciam a perda exponencial de resistência, assim chamado de *turning point* (Figura 10). Tal definição ajuda a avaliar as características e comportamentos das misturas, pode-se destacar que as misturas com cimento apresentam decréscimos de MR maiores antes da ruptura.

Observando a mistura de 4% de cimento com a mistura de 20% de cinza, ambas com 70% da carga de ruptura, observa-se que o geopolímero levou a uma vida de fadiga maior,

assim como seu decréscimo de MR ao longo dos ciclos foi mais suave. Utilizando as contatações anteriores, tal afirmação vai de encontro ao comportamento observado para as deformações. De maneira geral o acréscimo nas deformações gerados pela ciclagem foi mais suave antes da ruptura.

Pode-se considerar que desde o momento de início da ciclagem o material inicia sua degradação, sendo que microfissuras ocorrem de maneira tímida. Outra forma de avaliar esse momento em que as microfissuras acabam se tornando grande dano ao material pode ser definido de acordo com a lógica utilizada no trabalho de Mohammadinia et al. (2019) e caracterizado como o momento em que o MR atinge o valor de 50% do MR inicial.

Figura 55 – Obtenção do número de ciclo para cada mistura

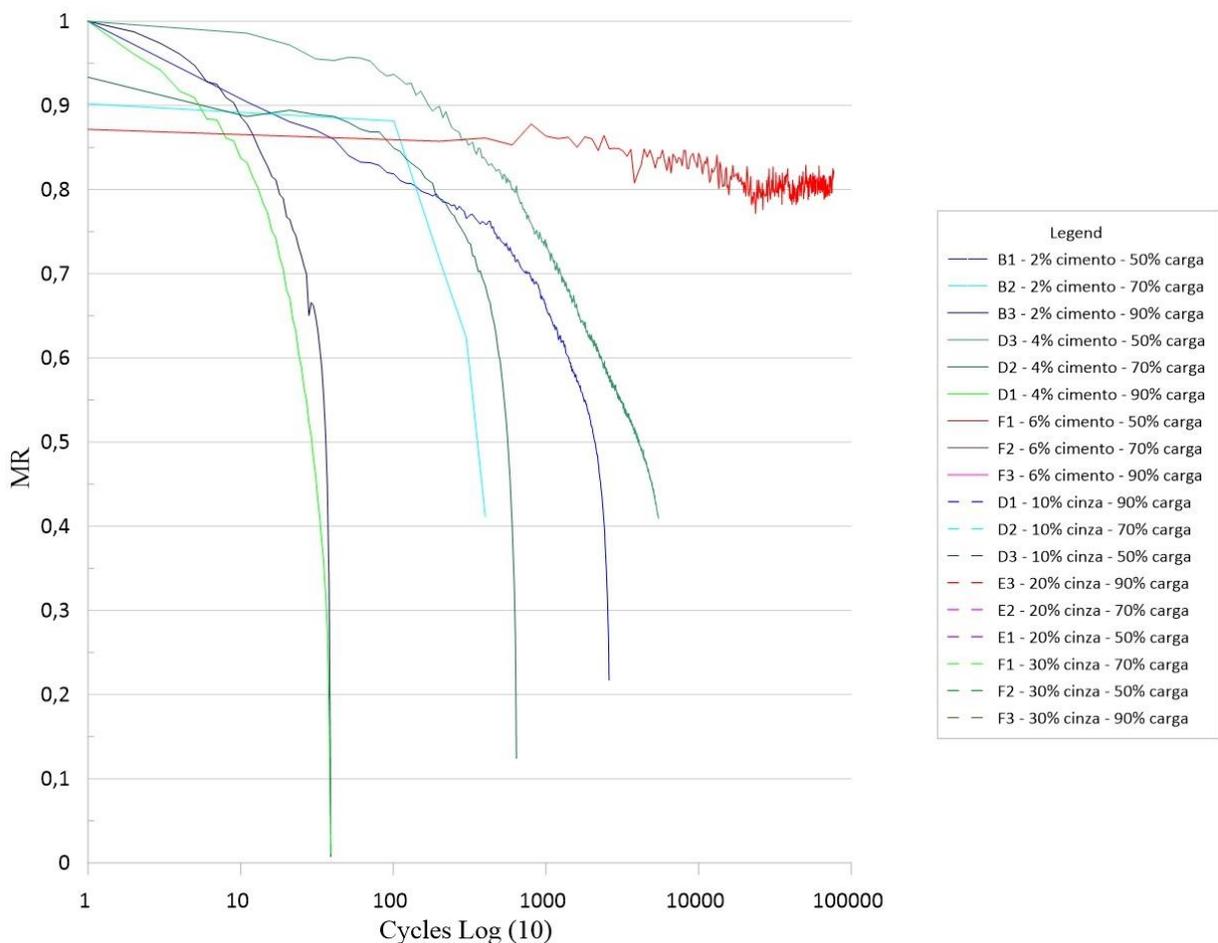


Fonte: Próprio Autor (2022).

Outra análise realizada para explicar o comportamento dos materiais e comparar a cimentação de cimento Portland com a cimentação de geopolímero foi feita normalizando-se os resultados de fadiga para mitigar a influência dos valores absolutos no resultado. A Figura

54 apresenta o comportamento de fadiga normalizada para cimento Portland. Ressalta-se que as mistura com 6% de cimento acabaram por não romper, mesmo após 100.000 ciclos. Da mesma forma também não perderam mais do que 50% de seu MR ao longo do ensaio. As misturas com 10% de cimento acabaram se mostrando as misturas que menos mantiveram o MR ao longo dos ensaios. A mistura de 4% também de maneira geral acabou apresentando curvas mais suaves antes da queda mais considerável de seu MR.

Figura 56 – Fadiga normalizada para Cimento Portland

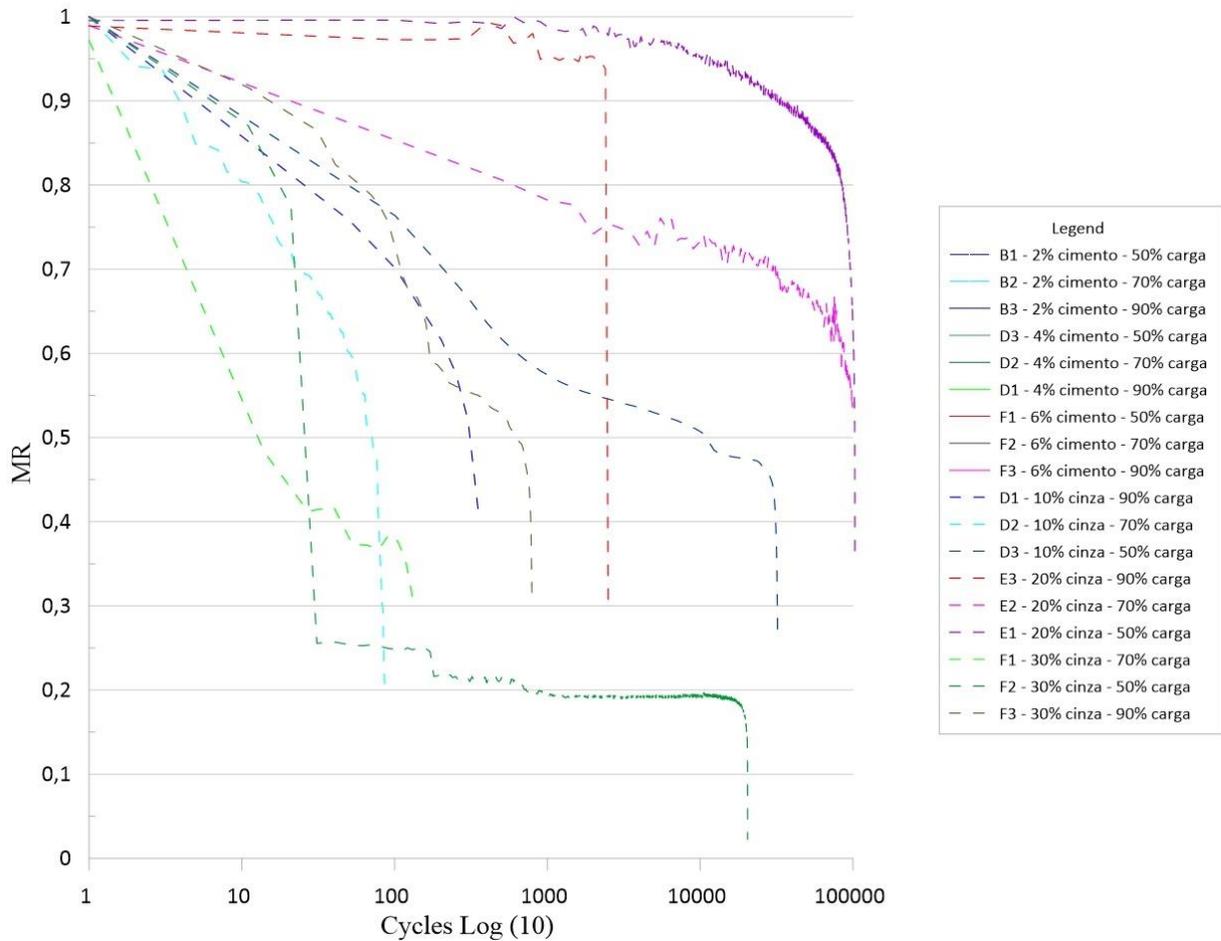


Fonte: Próprio Autor (2022).

Novamente para geopolímero realizaram-se as mesmas análises, na Figura 55 observa-se os resultados normalizados. Percebe-se que as misturas de 10% e 30% de cinza obtiveram as menores vida de fadiga, também de maneira geral mostram curvas mais inclinadas, o que poderia caracterizar comportamentos menos frágeis comparando-se com a mistura de 20% de cinza. As curvas para as misturas de 20% mostram grande manutenção do MR ao longo dos

ciclos, sendo que apenas a mistura com 90% de relação de tensão acabou apresentando uma ruptura abrupta após sua vida de fadiga.

Figura 57 – Fadiga normalizada para geopolímero



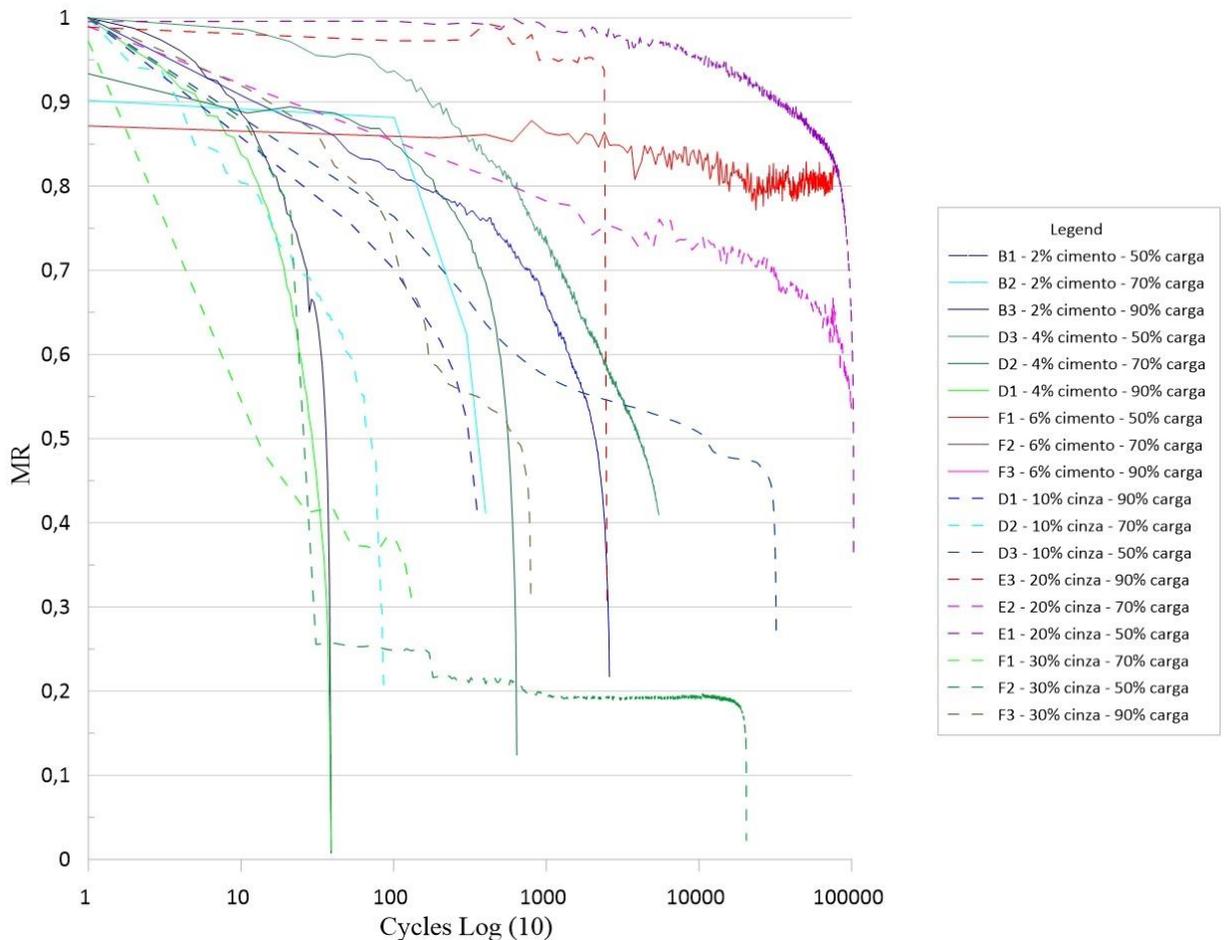
Fonte: Próprio Autor (2022).

Para comparação entre os resultados obtidos em ambos os materiais foi montado um gráfico que pode ser observado na Figura 56. Devido ao grande número de resultados, o gráfico acaba não sendo o ideal para comparar os materiais, para tanto, após análises individuais, retiraram-se os piores resultados de ambos os materiais e relacionados na Figura 57. Ressalta-se que neste momento os dados de 6% foram deixados de lado, pois de maneira geral todos acabaram não rompendo, independente da relação de tensões. Esta situação pode ser relacionada ao limite físico do pórtico metálico desenvolvido para este trabalho. O Mesmo não permitia acréscimo de carga, portanto os valores projetados de 50%, 70% e 90% de relação de

tensão não foram atingidos. Desta forma, não levando os corpos de prova a ruptura. Utilizando-se então apenas o resultado de 4% de cimento e 20% de cinza para análise, destaca-se:

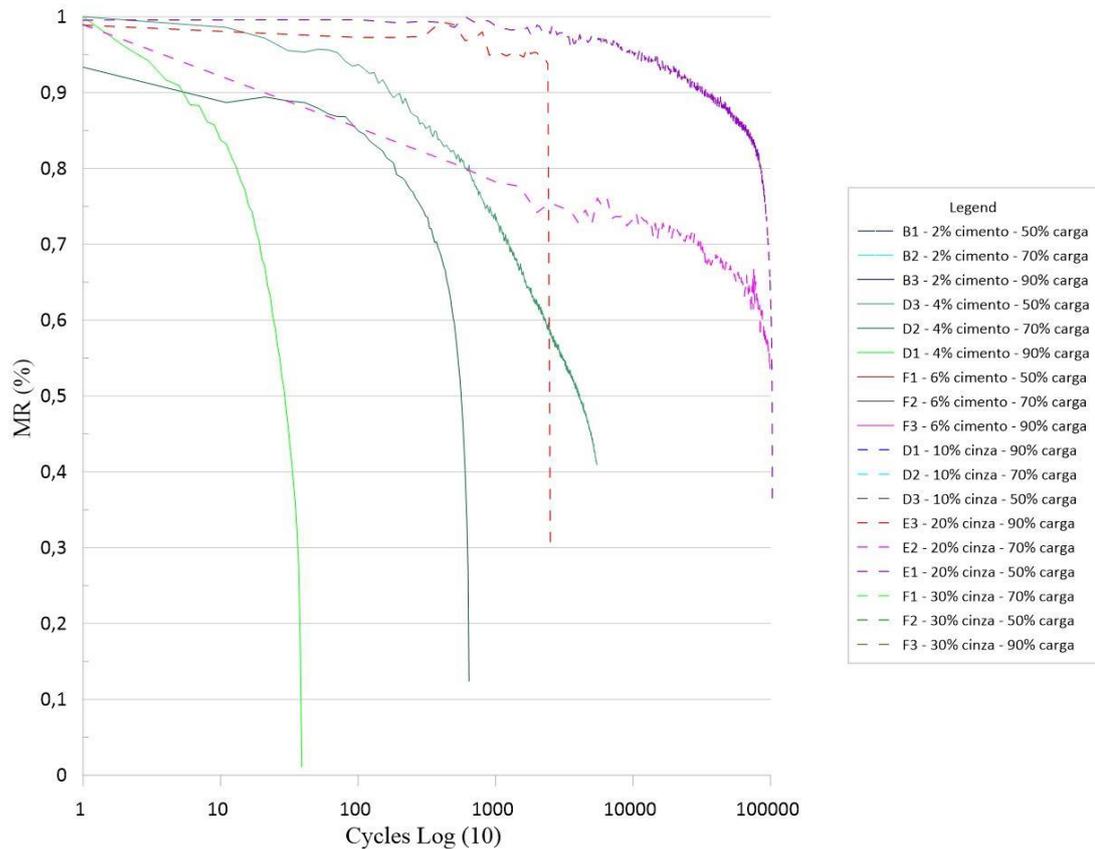
- As misturas de geopolímero apresentaram maior manutenção de MR ao longo dos ciclos;
- As misturas de geopolímero apresentaram maior vida de fadiga comparando-se com cimento Portland;
- A medida que aumentou-se a relação de tensão, diminuiu-se a vida de fadiga e também a inclinação das curvas;
- O comportamento resiliente da mistura de geopolímero apresenta característica mais dúctil que as misturas com cimento Portland

Figura 58 – Fadiga normalizada comparativa completa



Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 59 – Fadiga normalizada comparativa

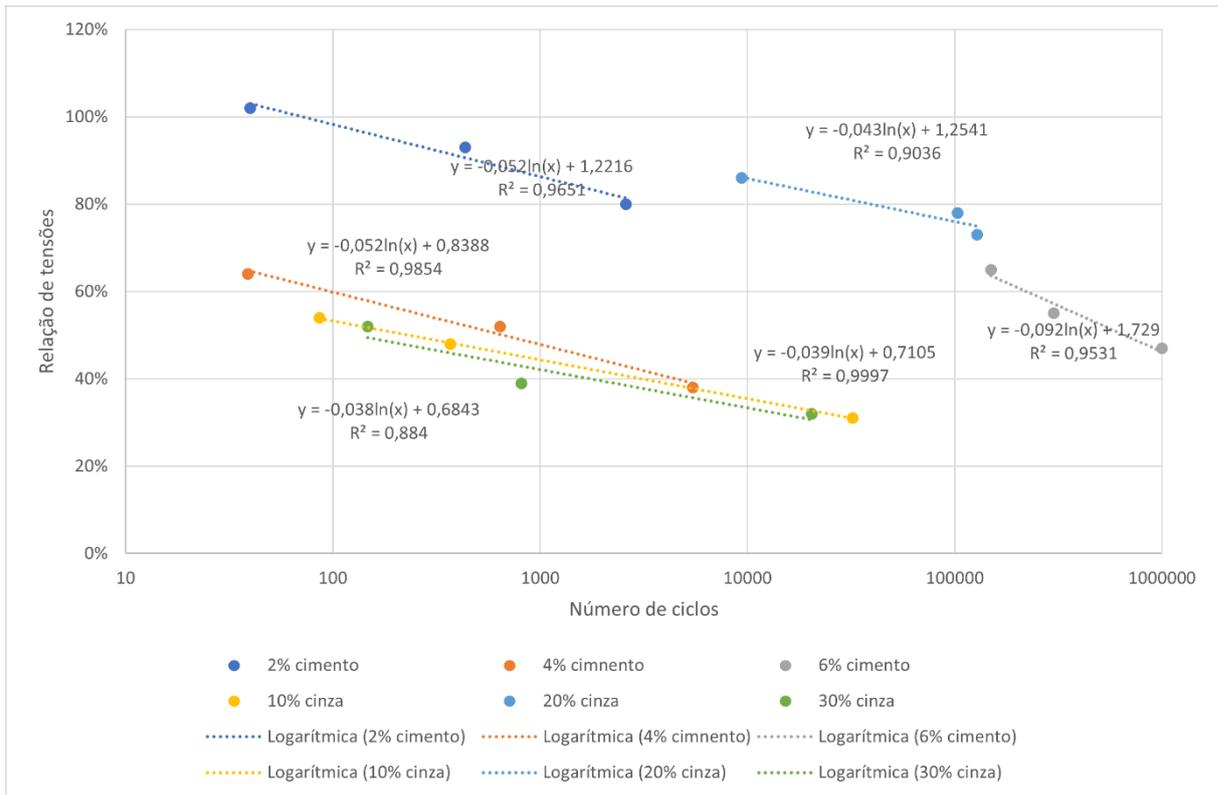


Fonte: Próprio Autor (2022).

De maneira geral, assim como proposto por Consoli (2018, 2021) a relação existente entre o teor de cimento/vazios presentes em cada mistura poderia ser utilizado para explicar as diferenças no MR. Também observando-se que a parcela viscosa remanescente no ligante asfáltico residual poderia influenciar no comportamento de acordo com as temperaturas utilizadas para ensaio ou aplicação de campo.

A última análise realizada quanto as características dos materiais foi a elaboração das curvas de desempenho das misturas. Neste momento foram calculadas as relações de tensão (tensão ensaio/tensão máxima de ruptura) e plotadas *versus* número de ciclos em escala logarítmica (Figura 58). Para todas as misturas, excluindo-se a de 30% de cinza, todos os resultados de R^2 foram superiores a 90%. O resultado para 2% de cimento acabou descolando-se de seus pares, visto que foram os corpos de prova que conseguiram ser ensaiados com as maiores relações de tensão, devido as limitações do equipamento. De maneira análogo os corpos de prova de 6% de cimento e 20% tiveram a limitação do equipamento para testarem-se relações de tensão maiores.

Figura 60 – Equações de fadiga



Fonte: Próprio Autor (2022).

CONCLUSÕES

Um programa experimental extensão foi conduzido neste trabalho, com foco na identificação de parâmetros mecânicos e de durabilidade para misturas de fresado, agregados virgens e diferentes tipos de cimento. Levando-se em consideração os resultados encontrados, pode-se chegar à conclusão que é possível tecnicamente o uso de cimentação de material fresado com geopolímero.

Os resultados de resistência mecânica à compressão apresentaram valores mínimos necessários para o uso em bases cimentadas 2,1 MPa. Sendo que para tempos de cura avançado (maior que 365 dias) obteve-se resultados superiores a 30MPa. De ambos os precursores testados, ressalta-se a diferença existente no comportamento durante a mistura. A cinza volante apresentou-se menos trabalhável, exigindo cuidados adicionais para o procedimento de mistura. Assim como apresentado pela bibliografia (TORGAL e JALALI, 2009; GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2015b; NADOUSHAN e RAMEZANIANPOUR, 2016), o silicato também teve influência na facilidade de mistura dos materiais, sendo que após o trabalho piloto se conseguiu realizar uma mistura satisfatória de todas as misturas.

A temperatura mostra-se fator essencial para definição do comportamento do material, realizaram-se várias tentativas para utilizar temperaturas próximas à temperatura ambiente, chegando-se a um valor praticável de 50°C, de maneira análoga ao estudado por Kong e Sanjayan (2010). Além também de ter validados as mesmas conclusões acerca da importância da escolha da temperatura que outros trabalhos na literatura (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 1999; WANG *et al.*, 1994; MUÑIZ-VILLARREAL *et al.*, 2011). Durante a moldagem e desmoldagem dos corpos de prova, percebe-se que vários mantinham-se úmidos após o período de cura em temperatura ambiente. Isso pode indicar não uma incapacidade de trabalhar com o material, mas a necessidade de maior tempo de cura ou maior temperatura. Internamente os corpos de prova encontravam-se úmidos, e a camada externa já com certa resistência. Visando uma aplicação de campo, a compactação em camadas e a possibilidade de cura de áreas maiores seriam possibilidades para solucionar este problema.

O material fresado utilizado para a reciclagem profunda de pavimentos mostrou-se influente nas características mecânicas do material obtido assim como constante na bibliografia (PCA, 2005; DNIT, 2013; KOLIAS, 1996; DELLABIANCA, 2004). Na sua maioria, os resultados obtidos acabam tendo maior influência no MR e na vida de fadiga quanto maior o teor de material fresado. Atribuindo-se tal comportamento a parcela elástica remanescente no ligante envelhecido.

A molaridade da solução ativadora e a quantidade de silicato mostraram-se influentes no resultado, sendo a primeira variável fixada (10 mols), resultado também semelhante ao obtido por Pinto (2004) e Wang *et al.* (2005). De maneira geral encontrou-se um teor ótimo de cinza (20%) e um teor ótimo de silicato (20%) para o geopolímero, assim, obtiveram-se resultados semelhantes aos obtidos com cimento Portland. Portanto pode-se concluir que o geopolímero atenderia tecnicamente os mesmos requisitos propostos na literatura (PCA, 2010).

No momento de avaliação comparativa entre cimento Portland e geopolímero, pode-se concluir que existe margem para dosagem do geopolímero para adequar-se de maneira econômica em relação ao cimento Portland, visto as grandes resistências obtidas a longos períodos.

Avaliando-se a durabilidade percebe-se que os ciclos de molhagem e secagem, acabam gerando algum acréscimo de resistências para o material cimentado com geopolímero. O que poderia ser atribuído a temperatura utilizada para os ciclos de secagem que acabam de certa forma trabalhando como cura para o material. Dentro das limitações do presente trabalho, pode-se dizer que a durabilidade do fresado com geopolímero apresenta propriedades superiores a cimentações realizadas apenas com cimento Portland.

Nos ensaios de fadiga por flexão-tração em quatro pontos, obtiveram-se comportamentos semelhantes entre ambas as cimentações, sendo que o geopolímero de maneira geral acaba aparentemente levando a rupturas mais dúcteis e queda de módulo significativa antes da ruptura das amostras. Sobre as relações de tensão, a maior parte das combinações utilizadas não apresentou ruptura a 50% da tensão máxima da mistura. Sendo que amostras de 2% de cimento e 10% de cinza provavelmente não apresentariam características mínimas para utilização. De maneira geral, o restante das misturas atendeu aos requisitos da Portland Cement Association (2005, 2007, 2010), do Departamento de Estradas de Rodagem (2005) e DNIT (2013).

Conclui-se que foi possível dosar um geopolímero direcionado a cimentação de material fresado. Obtiveram-se parâmetros como molaridade, relação sólido/líquido e teor de cimento álcali ativado suficientes para atingir os requisitos mínimos das normas de bases cimentadas. As propriedades mecânicas estudadas foram sempre iguais ou até superiores ao desempenho observado para misturas com cimento Portland. As tentativas utilizando-se cimento álcali ativado foram mais dúcteis e apresentaram vida de fadiga semelhante as misturas mais ricas em cimento Portland. Em relação a durabilidade das misturas, os ciclos de molhagem e secagem acabaram por aumentar a resistência dos corpos de prova em alguns casos. A cura das misturas álcali ativadas acabaram por apresentaram um ganho de resistência mais tardio que de alguma

maneira foi beneficiado pelas ciclagens. Pode-se concluir que a melhor mistura, do ponto de vista de vida de fadiga, seria a mistura com 20% de cinza e 20% de silicato, conseguindo equiparar-se com as misturas de 4% e 6% de cimento Portland.

Por fim, com base nos experimentos realizados ao longo deste estudo é possível afirmar que o cimento alternativo apresenta potencial de aplicação em campo. Neste aspecto, são considerados elementos como durabilidade, análise de resistência e fadiga, onde os testes demonstraram que as misturas com cimento alcáli-ativados são capazes de desempenhar de forma satisfatória.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar novas combinações de variáveis;
- Realizar avaliação econômica da utilização de geopolímero;
- Verificar a viabilidade de fontes alternativas de precursores e ativadores;
- Realizar uma dosagem mais pobre em silicato visando economia;
- Testar dosagens a temperatura ambiente com tempo de cura avançado;
- Avaliar a influência no procedimento de cura no MR;
- Verificar a possibilidade de utilização do material estudado como revestimento;
- Realizar avaliação do melhor procedimento de cura utilizando-se CBR;
- Comparar ambas as cimentações utilizando-se ACV;
- Realizar análise com MEV para ambos os materiais;
- Avaliar se a relação agente cimentante/teor de vazios influencia no MR.

REFERÊNCIAS

ADHIKARI, S., KHATTAK, M.J., ADHIKARI, B. Mechanical characteristics of Soil-RAP-Geopolymer mixtures for road base and subbase layers. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 21, p. 483-496, 2020.

ALANAZI, Hani et al. Bond strength of PCC pavement repairs using metakaolin-based geopolymer mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 75-82, 2016.

Alghamri, R., Kanellopoulos, A., Al-Tabbaa, A., 2016. Impregnation and encapsulation of lightweight aggregates for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, 124, 910–921.

AL-HDABI, A. Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete mixture with Rice Husk Ash as filler. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 544-51, 2016.

ALVARENGA, C.B.C.S. **Síntese e caracterização de geopolímeros à base de metacaulim e micropartículas de vidro soda-cal**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

AMRAN, Mugahed; DEBBARMA, Solomon; OZBAKKALOGLU, Togay. Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. **Construction and Building Materials**, v. 270, p. 121857, 2021.

ARANHA, L.A. **Avaliação laboratorial e de campo da tecnologia de reciclagem de base com cimento para a reabilitação de pavimentos**. 2013. 127p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo.

ARULRAJAH, A. PIRATHEEPAN, J. DISFANI, M.M. Reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate blends in pavement subbases: Laboratory and field evaluation. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, p. 349–357, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044: Gestão ambiental-avaliação do ciclo de vida-requisitos e orientações**. ABNT, 2009b.

ASSOCIATION OF AUSTRALASIAN ROAD TRANSPORT AND TRAFFIC AGENCIES. **Cost effective structural treatments for rural highways: cemented materials**. Austroads Publication AP-T168. Sydney, 188p. 2010.

ASSOCIATION OF AUSTRALASIAN ROAD TRANSPORT AND TRAFFIC AGENCIES. **Mix design for stabilized pavement materials**: Austroads Publication AP-T16. Sydney, 43p. 2002.

ATIS, C.D., BILIM, C., ÇELIK, O., KARAHAN, O. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 548–555, 2009.

Austrroads 2016a, Specification of geopolymer concrete: general guide, AP-R531-16, Austrroads, Sydney, NSW.

Austrroads 2016b, 'Specification and use of geopolymer concrete in the manufacture of structural and non- structural components: experimental work', Austrroads, Sydney, Australia.

AVIRNENI, D. SARIDE, S. Durability Studies on Fly Ash Stabilized Reclaimed Asphalt Pavement Materials. **In Proceedings of the Geo-Chicago 2016, Chicago, IL, USA**, 14–18 August 2016; American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, pp. 546–555, 2016.

AVIRNENI, D., PEDDINTI, P.R.T., SARIDE, S. Durability and long term performance of geopolymer stabilized reclaimed asphalt pavement base courses. **Construction and Building Materials**, v.121, p.198–209, 2016.

AVIRNENI, Deepti; PEDDINTI, Pranav RT; SARIDE, Sireesh. Durability and long term performance of geopolymer stabilized reclaimed asphalt pavement base courses. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 198-209, 2016.

AWOYERA, P., ADESINA, A. A critical review on application of alkali activated slag as a sustainable composite binder. **Case Studies in Construction Materials**, v. 11:e00268, 2019.

AZARIJAFARI, Hessam; YAHIA, Ammar; AMOR, Mourad Ben. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2187-2197, 2016.

AZARIJAFARI, Hessam; YAHIA, Ammar; AMOR, Mourad Ben. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2187-2197, 2016.

AZEVEDO, A.G.S., STRECKER, K., ARAÚJO JR., A.G., SILVA, C.A. Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na₂O e Na₂SiO₃. **Cerâmica**, v. 63, p.143-151, 2017.

BACK, A.H. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas cimentadas do tipo BGTC utilizando duas rochas extrusivas representativas do estado do RS**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, 2022.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p., il.

BARBOSA, V. F. F.; MACKENZIE, K. J. D.; THAUMATURGO, C. Synthesis and Characterisation of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: sodium polysialate polymers. **International Journal of Inorganic Materials**, v. 2, n. 4, p. 309-317, 2000.

BARBOSA, V. F. F.; MACKENZIE, K. J. D.; THAUMATURGO, C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polysialate polymers. **International Journal of Inorganic Materials**, v. 2, n. 4, p. 309-317, 2000.

BEHAK, L. **Análise estrutural de Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego Revestidos com Solo Modificado com Cal Considerando Ensaio Laboratoriais e Monitoramento de Trechos Experimentais**. 2013. 298p. Tese de Doutorado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BERNAL, S.A., RODRÍGUEZ, E.D., MEJIA DE GUTIÉRREZ, R., PROVIS, J.L., DELVASTO, S. Activation of metakaolin/slag blends using alkaline solutions based on chemically modified silica fume and rice husk ash. **Waste and Biomass Valorization**, v. 3, p. 99–108, 2012.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010. 504 p.

BLISSARI, E.S., SPRICIGO, L.P., CONTE, V., UGGIONI, E., BERNARDIN, A.M. Geopolímeros Obtidos a Partir de Cinzas de Carvão Mineral. **In: Seminário de pesquisa, extensão e inovação do Instituto Federal de Santa Catarina**, 2011. Anais...Criciúma: IFSC, 2011.

BONDAR, D., LYNDSTALE, C.J., RAMEZANIANPOUR, A.A. Alkali Activation of Natural Pozzolan for Geopolymer Cement Production. **In: International Conference on Concrete & Development**, 2., Tehran, 2005. Tehran, 2005.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. 3 Ed., São Paulo, Exceção Editorial, 2011. BRAHAM, A. Comparing life-cycle cost analysis of full-depth reclamation versus traditional pavement maintenance and rehabilitation strategies. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2573, p. 49–59, 2016.

BRITO, L.A.T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

BRUSCHI, G.J., SANTOS, C.P., FERRAZZO, S.T., ARAÚJO, M.T., CONSOLI, N.C. Parameters controlling loss of mass and stiffness degradation of green stabilized bauxite tailings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering**, p. 1–21, 2021.

BRUSCHI, G.J., SANTOS, C.P., LEVANDOSKI, W.M.K., FERRAZZO, S.T., KORF, E.P., SALDANHA, R.B. Leaching assessment of cemented bauxite tailings through wetting and drying cycles of durability test. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 59247-59262, 2022.

BRUSCHI, G.J., SANTOS, C.P., TONINI, A.M, FERRAZZO, S.T, MARQUES, S.F.V, CONSOLI, N.C. Green Stabilization of Bauxite Tailings: Mechanical Study on Alkali-Activated Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33:06021007, 2021.

Buchwald, A, Vanooteghem, M, Gruyaert, E, Hilbig, H & De Belle, N 2015, 'Purdocement: application of alkali-activated slag cement in Belgium in the 1950s', **Materials and Structures**, vol. 48, no. 1-2, pp. 501- 11.

BUCHWALD, A., DOMBROWSKI, K., WEIL, M. Development of Geopolymer Concrete Supported by System Analytical Tools. **Proceedings of the 2nd International Symposium of Non-tradition Cement and Concrete**, p. 25-35, 2005.

CABRAL, L. DO N.; PEREIRA, S. S.; ALVES, T. L. B. **Degradação ambiental e implicação para a saúde humana decorrentes da mineração: o caso dos trabalhadores de uma pedreira no município de Campina Grande/PB**. Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde, v.8, n.15, 2012.

CALLISTER J.R, WILLIAM, D., RETHWISCH, D.G. **Ciência e engenharia de materiais – uma introdução**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CASSEL, L. D. **Manifestação patológica em sistemas geopoliméricos produzidos com metacaulim: avaliação da susceptibilidade no desenvolvimento de eflorescências**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre, 2018.

CASTAÑEDA LÓPEZ, Mario Alexander. **Reciclagem de pavimentos flexíveis com adição de cimento Portland: estudo de fadiga através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. 2016. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

CESARI, V. F. **Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

CHANG, J. J., 2003. A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. **Cement and Concrete Research**, 33, 1005-1011.

CHANG, J.J. A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 7, p.1005–1011, 2003.

CHEN, Cong et al. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1231-1240, 2010.

CHINDAPRASIRT, P., JATURAPITAKKUL C., CHALEE, W., RATTANASAK, U. Comparative Study on the Characteristics of Fly Ash and Bottom Ash Geopolymers. **Waste Management**, v. 29, n. 2, p. 539-543, 2009.

COLPO, G. B. **Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

CONSOLI, N.C. FOPPA, D. FESTUGATO, L. HEINECK, K.S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 2, p. 197-205, 2007.

CONSOLI, N.C., GIESE, D.N., LEON, H.B., MOCELIN, D.M., WETZEL, R., MARQUES, S.F.V. Sodium chloride as a catalyser for crushed reclaimed asphalt pavement – fly ash – carbide lime blends. **Transportation Geotechnics**, v. 15, p.13–19, 2018.

CONSOLI, N.C., TONINI, A.M., TONATTO F.S., LIMA R.V., GRAVINA, R.C. Increasing density and cement content in stabilization of expansive soils: Conflicting or complementary procedures for reducing swelling? **Canadian Geotechnical Journal**, v. 58, p. 866-878, 2021.

CONSOLI, Nilo Cesar et al. Key parameters controlling dynamic modulus of crushed reclaimed asphalt paving–powdered rock–Portland cement blends. **Road materials and pavement design**, v. 19, n. 8, p. 1716-1733, 2018.

COPELAND, A. **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice**. Federal Highway Administration, McLean, Virginia, 2011.

CORMA, A. State of the art and future challenges of zeolites as catalysts. **Journal of Catalysis**, v. 216, n. 1-2, p. 298-312, 2003.

CORREIA, E. A. S. **Compósitos de Matriz Geopolimérica Reforçados com Fibras Vegetais de Abacaxi e de Sisal**. 2011. (Tese). Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal da Paraíba.

CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. **Fuel**, v. 84, n. 16, p. 2048-2054, 2005.

CRUZ, R. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatação de uma areia artificialmente cimentada**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2008.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, G. C (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, v.1, cap.12, p. 345-380, 2005.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – CPGEC/UFRGS. Porto Alegre. 2009.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymers – chemistry and applications**. 3. ed. In: Institute Géopolymère, Saint-Quentin, France, 2011.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, J. **Mineral polymers and methods of making them**: US n. P: 4349386, 1982.

_____. **Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process**: US n. P: 4472199, 1984.

_____. Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. **Journal of thermal analysis**, v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.

_____. **Method for obtaining a geopolymeric binder allowing to stabilize, solidify and consolidate toxic or waste materials**: US n. P: 5349118, 1994.

_____. **Geopolymer chemistry and applications**. Geopolymer Institute, 2008. ISBN 2951482019.

DAVIDOVITS, J.; DAVIDOVITS, M.; DAVIDOVITS, N. **Process for obtaining a geopolymeric alumino-silicate and products thus obtained**: US n. P: 5342595, 1994.

DAVIDOVITS, J.; SAWYER, J. L. **Early high-strength mineral polymer**: US n. P: 4509985, 1985.

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do Comportamento de Material Fresado de Revestimento Asfáltico Visando sua Aplicação em Reciclagem de Pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia), Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **Reciclagem de pavimento asfáltico in situ com cimento e brita**. DER/PR ES-P 035/05. Curitiba, 22 p., 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER: Glossário de termos técnicos rodoviários**. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação – Reciclagem de Profunda de Pavimentos “in situ” com adição de cimento Portland** – Especificação de serviço: DNIT 167/2013. Rio de Janeiro, 11p. 2013.

DIAZ-LOYA, E.I., ALLOUCHE, E.N., VAIDYA, S. Mechanical Properties of Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete, **ACI Materials Journal**, v. 108, n. 3, p. 300–306, 2011.

DNIT, **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. 2^a ed. Rio de Janeiro. 310 p. (Publ. IPR., 720). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006.

DONG, Minhao et al. Development of a High Strength Geopolymer by Novel Solar Curing. **Ceramics International**, v. 43, n. 14, p. 11233-11243, 2017.

DUXSON, P. et al. Geopolymer technology: The current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917-2933, 2007.

DUXSON, P. et al. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 292, n. 1, p. 8-20, 2007.

DUXSON, P. et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 269, n. 1-3, p. 47-58, 2005.

DUXSON, P. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PROVIS, J.L., LUKEY, G.C., PALOMO, A., VAN DEVENTER, J.S.J. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917-2933, 2007.

EDEH, J.E., ONCHE, O.J.J., OSINUBI, K.J. Rice Husk Ash Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Using Cement As Additive. **GeoCongress 2012**, p. 3863-3872, 2012.

EDUOK, E.I. **Thermal Properties of Geopolymer Materials**. Dissertação de Mestrado, University of Stavanger, Norway, 2016.

FANG, S., LAM, E.S.S., LI, B., WU, B. Effect of alkali contents, moduli and curing time on engineering properties of alkali activated slag. **Construction and Building Materials**, v. 249, 118799, 2020.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Pavement recycling guidelines for state and local governments: Technical Report No. FHWA-AS- 98-042**, Washington, DC, USA, 1997.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento Portland: Definição das bases para um Método de Dosagem**. 2015. 162p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

FERNÁNDEZ JIMÉNEZ, A.M, PALOMO, A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements, **Fuel**, v. 82, n. 18, p. 2259–2265, 2003.

FERNÁNDEZ JIMÉNEZ, A.M, PALOMO, A. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator, *Cem. Concr. Res.* 35 (10) (2005) 1984–1992.

FERNÁNDEZ JIMÉNEZ, A.M, PALOMO, A., SOBRADOS, I., SANZ, J. The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes, *Microporous and Mesoporous Materials*. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 91, n. 1-3, p. 111–119, 2006.

FERNÁNDEZ JIMÉNEZ, A.M. **Cementos de escorias activadas alcalinamente: influencia de las variables y modelización del proceso**. Tese de doutorado. Universidad Autónoma de Madrid, 2000.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. **Fuel**, v. 82, n. 18, p. 2259-2265, 2003.

_____. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 10, p. 1984-1992, 2005.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, J. G.; PUERTAS, F. Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1313-1321, 1999.

FONTES, L.P.T.L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. Tese de Doutorado em Engenharia. Universidade do Minho, 2009.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2005.

FORMIA, A., Terranova, S., Antonaci, P., Pugno, N.M., Tulliani, J.-M., 2016. Experimental analysis of self-healing cement-based materials incorporating extruded cementitious hollow tubes. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 27, 19, 2633-2652.

GAO, K. et al. Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated characteristics of metakaolin-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 441-447, 2013.

GARCIA-LODEIRO, I., PALOMO, A., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. Crucial insights on the mix design of alkali-activated cement-based binders. In: PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J.; LEONELLI, C.; PALOMO, A.; CHINDAPRASIT, P. (Org.). **Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, p. 49–73, 2015.

GERALDO, R.H., FERNANDES, L.F.R., CAMARINI, G. Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p.146–55, 2017.

GHAZOUNI, A., OUAMARA, L., SOBRADOS, I., ROSSIGNOL, S. Alkali-activated materials from different aluminosilicate sources: Effect of aluminum and calcium availability. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 484, p. 14–25, 2018.

GILFORD III, J., Hassan, M. M., Rupnow, T., Barbato, M., Okeil, A., Asadi, S., 2013. Dicyclopentadiene and sodium silicate microencapsulation for self-healing of concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 26, 886-896.

GÖRHAN, G., KÜRKLÜ, G. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. **Composites Part B: Engineering**, v. 58, p. 371–377, 2014.

GREGG, Jay S.; ANDRES, Robert J.; MARLAND, Gregg. China: Emissions pattern of the world leader in CO₂ emissions from fossil fuel consumption and cement production. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 8, 2008.

GUERRIERI, M., SANJAYAN, J.G. Behavior of combined fly ash/slag-based geopolymers when exposed to high temperatures. **Fire and Materials**, v. 34, p. 163–175, 2010.

HABERT, G., DELACAILLERIE, J.B.D.E., ROUSSEL, N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 11, pp. 1229-1238, 2011.

HABERT, G.; DE LACAILLERIE, JB D.'Espinose; ROUSSEL, N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. **Journal of cleaner production**, v. 19, n. 11, p. 1229-1238, 2011.

HARDJITO, B., RANGAN, B.V. **Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete**. Research Report GC1. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology. Perth, Australia, 2005.

HARDJITO, B.; RANGAN, B. V. Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. Research Report GC1. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology. Perth, Australia, p. 103. 2005.

HARVEY, J. et al. Pavement life cycle assessment workshop: discussion summary and guidelines. **University of California Pavement Research Center, California**, 2010.

HARVEY, John; MEIJER, Joep; KENDALL, Alissa. **Life Cycle Assessment of Pavements**. 2014.

HERMANN, E. et al. Solidification of various radioactive residues by geopolymers with special emphasis on long term stability. **Proc. Int. Conf. Geopolymer**, 1999. p.211-228.

HOOTON, R.D., SHI, C., DAY, R.L. Selectivity of alkaline activators for the activation of slags. **Cement Concrete and Aggregates**, v. 18, n. 1, 1996.

HORPIBULSUK, S., HOY, M., WITCHAYAPHONG, P., RACHAN, R., ARULRAJAH, A. Recycled asphalt pavement fly ash geopolymer as a sustainable stabilized pavement material. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 73, p. 012005, 2017.

HORVATH, Arpad; HENDRICKSON, Chris. Comparison of environmental implications of asphalt and steel-reinforced concrete pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1626, p. 105-113, 1998.

HOY, M., HORPIBULSUK, S., ARULRAJAH, A., MOHAJERANI, A. Strength and Microstructural Study of Recycled Asphalt Pavement: Slag Geopolymer as a Pavement Base Material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, 04018177, 2018.

HOY, Menglim et al. Effect of wetting–drying cycles on compressive strength and microstructure of recycled asphalt pavement–Fly ash geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 624-634, 2017.

HOY, Menglim; HORPIBULSUK, Suksun; ARULRAJAH, Arul. Strength development of Recycled Asphalt Pavement–Fly ash geopolymer as a road construction material. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 209-219, 2016a.

HUANG, B; SHU, X; LI, G. Laboratory Investigation of Portland Cement Concrete Containing Recycled Asphalt Pavements. **Cement and Concrete Research**, v. 35, No 10, p. 2008-2013, 2005. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.05.002

HUANG, Y. **Life Cycle Assessment of Use of Recycled Materials in Asphalt Pavements**. Newcastle University, 2007.

HUNT, Robert G.; SELLERS, Jere D.; FRANKLIN, William E. Resource and environmental profile analysis: a life cycle environmental assessment for products and procedures. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 12, n. 3, p. 245-269, 1992.

IAB (Instituto aço Brasil). **Relatório de sustentabilidade 2018**, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/ESTATIS%20PDF/Preliminar_Julho_2018_948757994.pdf

IEA (International Energy Agency). **Technology Roadmap**. Low-Carbon Transition in the Cement Industry. 2018. França.

INGLES, O.G., METCALF, J.B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Australia: Butterworth’s Pty. Limited, 1972.

INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES (IECA). **Reciclado de firmes in situ con cemento: Guías técnicas**, Madrid, Spain, 2013.

INYIM, Peeraya et al. Environmental assessment of pavement infrastructure: A systematic review. **Journal of environmental management**, v. 176, p. 128-138, 2016.

ISMAIL, I., BERNAL, S.A., PROVIS, J.L., SAN NICOLAS, R., HAMDAN, S., VAN DEVENTER, J.S.J. Modification of Phase Evolution in Alkali-Activated Blast Furnace Slag by the Incorporation of Fly Ash. **Cement & Concrete Composites**, v. 45, p. 125-135, 2014.

ISO, NBR. 14040. Gestão ambiental–Avaliação do ciclo de vida–Princípios e estrutura. **Rio de Janeiro: ABNT**, 2009a.

JALLU, M., ARULRAJAH, A., SARIDE, S., EVANS, R. Flexural fatigue behavior of fly ash geopolymer stabilized-geogrid reinforced RAP bases. **Construction and Building Materials**, v. 254, p. 119263, 2020.

JRC-IES: EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. Luxemburgo Publications Office of the European Union, 2010.

KANG, X., GE, L., KANG, G.C., MATHEWS, C. Laboratory investigation of the strength, stiffness, and thermal conductivity of fly ash and lime kiln dust stabilised clay subgrade materials. **Road Materials and Pavement Design**, v. 16, p. 928–945, 2015.

KANG, X., KANG, G.C., CHANG, K.T., GE, L. Chemically Stabilized Soft Clays for Road-Base Construction. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 7, p. 4014199.

KHALE, D., CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of Materials Science**, v. 42, p. 729-746, 2007.

KIRSCHNER, A. V.; HARMUTH, H. Investigation of geopolymer binders with respect to their application for building materials. **Ceramics - Silikaty**, v. 48, n. 3, p. 117-120, 2004.

KLEINERT, T. **Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento: contribuição ao desenvolvimento de uma metodologia de dosagem**. 2016. 177p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

KOLIAS, S. The influence of type loading and temperature on the modulus of elasticity of cement-bound mixes of milled bituminous concrete and crushed aggregates. **Materials and structures**, v. 29, p. 543-551, nov. 1996.

KOMNITSAS, K, Zaharaki, D & Perdikatsis, V 2007, 'Geopolymerisation of low calcium ferronickel slags', **Journal of Materials Science**, vol. 42, pp. 3073-82.

KONG, D., SANJAYAN, J.G. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 2, p. 334–339, 2010.

KONG, D.L.Y., SANJAYAN, J.G. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 986–991, 2008.

LEE, J.K., SHANG, J.Q. Evolution of thermal and mechanical properties of mine tailings and fly ash mixtures during curing period. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 51, n. 5, p. 570–582, 2014.

LEE, W. K. W.; VAN DEVENTER, J. S. J. The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 211, n. 2-3, p. 115-126, 2002.

LI, C., SUN, H., LI, L. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements, **Cement and Concrete Research**, v. 40, p.1341–1349, 2010.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2007.

LUUKKONEN, T., ABDOLLAHNEJAD, Z., YLINIEMI, J., KINNUNEN, P., ILLIKAINEN, M. Comparison of alkali and silica sources in one-part alkali-activated blast furnace slag mortar. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p.171-9, 2018.

MARQUES S. **Estudo do comportamento de uma areia artificialmente cimentada a altas tensões de confinamento**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2016.

MEJÍA JM, MEJÍA DE GUTIÉRREZ R, PUERTAS F. Ceniza de cascarilla de arroz como fuente de sílice en sistemas cementicios de ceniza volante y escoria activados alcalinamente. **Materiales de construcción**, v. 63, p. 361-375, 2013.

MILAD, A., ALI, A.S.B., BABALGHAITH, A.M., MEMON, Z.A., MASHAAN, N.S., ARAFA, S., MD. YUSOFF, N.I. Utilisation of Waste-Based Geopolymer in Asphalt Pavement Modification and Construction—A Review. **Sustainability**, v. 13, 3330, 2021.

MINGUELA, J.D. **El estudio del comportamiento de los firmes reciclados in situ con cemento**. Tese de doutorado. University of Burgos, Spain, 2011.

MITCHELL, J.K. Soil Improvement: State-of-the-Art. **10 International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Stockholm, Sweden, v. 4, p. 509-565, 1981.

MO, B. H. ZHU, H., XUE-MIN, C., YAN, H.G., SI-YU. Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. **Applied Clay Science**, v. 99, p. 144–148, 2014.

MOGHADAM M. J., AJALLOEIAN, R., HAJIANNIA, A. Preparation and application of álcali-activated materials based on waste glass and coal gangue: A review. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 84–98, 2019.

MOH, Z. Reactions of soil minerals with cement and chemicals. **Highway Research Board**, v. 86, p. 39-61, 1965.

MUÑIZ-VILLARREAL, M.S., RAMÍREZ, M.A., BULBARELA, S.S., TIRADO, J.R., ARAIZA, J.L.R., ÁVALOS, J.C.R., BUENO, J.J.P., APATIGA, L.M., CADENA, A.Z., BORRÁS, V.A. The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. **Materials Letters**, v. 65, n. 6, p. 995-998, 2011.

NADOUSHAN, M. J., RAMEZANIANPOUR, A.A. The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 337–347, 2016.

NEDELJKOVIC, M., LI, Z., YE, G. Setting, Strength, and Autogenous Shrinkage of Alkali-Activated Fly Ash and Slag Pastes: Effect of Slag Content. **Materials**, v. 11, n. 11, 2018

NUNEZ, W.P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

OLIVEIRA, P.L. **Projeto Estrutural De Pavimentos Rodoviários E De Pisos Industriais De Concreto. Dissertação de Mestrado**. Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

OMETTO, Aldo Roberto. Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, Exergia e Emergia. **São Carlos. Tese (Doutorado)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005**.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 7, p. 1305-1314, 2008a.4

_____. Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 7, p. 1315-1322, 2008b.

PALACIOS, M., ALONSO, M.M., VARGA, C., PUERTAS, F. Influence of the alkaline solution and temperature on the rheology and reactivity of alkali-activated fly ash pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, p. 277–284, 2019.

PALOMO, A. et al. Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 7, p. 997-1004, 1999.

PALOMO, A., GRUTZECK, M.W., BLANCO, M.T. Alkali-Activated Fly Ashes: a cement for the future. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1323-1329, 1999.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 8, p. 1323-1329, 1999.

PASCHE, Eduardo et al. Avaliação da rigidez de misturas recicladas cimentadas: Abordagem elástica e viscoelásticas. **TRANSPORTES**, v. 26, n. 1, p. 94-107, 2018.

PASCHE, Eduardo. **Estudo da resistência e da rigidez de uma mistura de material fresado asfáltico e pó-de-pedra com a adição de cimento**. 2016. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

PEREIRA, C.S., BRUSCHI, G.J., MATTOS, J.R.G., CONSOLI, N.C. Stabilization of gold mining tailings with alkali-activated carbide lime and sugarcane bagasse ash. **Transportation Geotechnics**, v. 32:100704, 2022.

PHOO-NGERNKHAM, T., SATA, V., HANJITSUWAN, S., RIDTIRUD, C., HATANAKA, S., CHINDAPRASIRT, P. Compressive strength, Bending and Fracture Characteristics of High Calcium Fly Ash Geopolymer Mortar Containing Portland Cement Cured at Ambient

Temperature. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 4, p. 1263–1271, 2015.

PINTO, A. T. **Sistemas de ligantes obtidos por ativação alcalina do metacaulino**. 2004. (Tese). Universidade do Minho.

PINTO, A.T. **Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina do Metacaulino**. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho, Portugal. 2004.

PIRES, E.F.C. **Propriedades de fratura e análise não-linear de vigas pré-moldadas de concreto geopolimérico: estudo comparativo**. Tese de Doutoramento. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

PIRES, G.M. **Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado com adição de cimento Portland e cinza de casca de arroz para aplicação em camadas de pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSM – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

POLTUE, T., SUDDEEPPONG, A., HORPIBULSUK, S., SAMINGTHONG, W., ARULRAJAH A., RASHID, A.S.A. Strength development of recycled concrete aggregate stabilized with fly ash-rice husk ash based geopolymer as pavement base material. **Road Materials and Pavement Design**, v.21, n. 8, p. 1–12, 2019.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). **Full-depth reclamation: Recycling roads saves money and natural resources: Publication SR995.02**, Skokie, USA, 2005.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). **Guide to Full Depth Reclamation (FDR) with Cement**, Skokie, USA, 2005.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Design of Full-Depth Reclamation with Portland Cement (FDR-PC) Pavements**. Annual Conference of the Transportation Association of Canada Halifax, Nova Scotia, Canada, 2010.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Full-Depth Reclamation using Portland Cement: A Study of Long-Term Performance**. Illinois, E.U.A, 2007.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. **Guide to Full Depth Reclamation (FDR) with Cement**. Illinois, E.U.A., 2005.

PRESTON, F., LEHN, J. Making Concrete Change Innovation in Low-carbon. **Cement and Concrete**, 2018.

PROVIS, J. L., BERNAL, S.A. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 44, n. 1, p. 299–327, 2014.

PROVIS, J. L., PALOMO, A., SHI, C. Advances in understanding alkaliactivated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 110–125, 2015.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. **Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications**. 1. ed. Washington, DC: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2009.

PROVIS, J.L. Activating solution chemistry for geopolymers. **Geopolymers**, p. 50–71, 2009.

PROVIS, J.L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v.114, p. 40-48, 2018.

PROVIS, JL & Bernal, SA 2014, 'Geopolymers and related alkali-activated materials', **Annual Review in Materials Research**, vol. 44, chapter 3, pp. 3.1-3.29, doi:10.1146/annurev-matsci-070813-113515.

PROVIS, JL, Palomo, A & Shi, C 2015, 'Advances in understanding alkali-activated materials', **Cement and Concrete Research**, vol. 78, part A, pp. 110-25.

QUEIRÓZ, C.L., DIAS, M.G., BRUSCHI, G.J., SAMPAIO, D.L.M. Macro–Micro Characterization of Green Stabilized Alkali-Activated Sand. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 40, n. 7, p. 3763 – 3778, 2022.

QUEIRÓZ, L.C., BATISTA, L.L.S., SOUZA, L.M.P., LIMA, M.D., DANIELI, S., BRUSCHI, G.J. Alkali-activated system of carbide lime and rice husk for granular soil stabilization. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement**, p.1–37, 2022.

RAMOS, Matheus Lutz. **Fatores que afetam a resistência à compressão simples de misturas de fresado asfáltico, solo laterítico e cimento portland**. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

REMMEN, Arne; JENSEN, Allan Astrup; FRYDENDAL, Jeppe. **Life Cycle Management: A Business Guide to Sustainability**. 2007.

RESTUCCIA, Luciana et al. New self-healing techniques for cement-based materials. **Procedia Structural Integrity**, v. 3, p. 253-260, 2017.

RICCI, G. **Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

RICKARD, W., WILLIAMS, R., TEMUJIN, J. Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high temperature applications. **Materials Science and Engineering: A**, v. 528, n. 9, p. 3390–3397, 2011.

ROBAYO-SALAZAR, R.A., DE GUTIÉRREZ, R.M. Natural volcanic pozzolans as an available raw material for alkali-activated materials in the foreseeable future: A review. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 109-118, 2018.

ROSSATO, Fábio Pereira et al. **Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSM – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SABITHA, D., DATTATREYA, J.K., SAKTHIVEL, N., BHUVANESHWARI, M., SATHIK, S.A.J. Reactivity, Workability and Strength of Potassium Versus Sodium-Activated High Volume Fly Ash-Based Geopolymers. **Current Science**, v. 103, n. 11, p. 1320-1327, 2012.

SANTA, R.A.A.B. **Desenvolvimento de Geopolímeros a Partir de Cinzas Pesadas oriundas da Queima do Carvão Mineral e Metacaulim Sintetizado a Partir de Resíduo da Indústria de Papel**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

SANTERO, Nicholas J.; MASANET, Eric; HORVATH, Arpad. Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 9-10, p. 801-809, 2011.

SANTOS, João et al. A life cycle assessment of in-place recycling and conventional pavement construction and maintenance practices. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 11, n. 9, p. 1199-1217, 2015.

SARIDE, S., AVIRNENI, D., CHALLAPALLI, S. Micro-mechanical interaction of activated fly ash mortar and reclaimed asphalt pavement materials. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 424-435, 2016.

SARIDE, S., JALLU, M. Effect of fly ash geopolymer on layer coefficients of reclaimed asphalt pavement bases. **Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements**, v. 146, n. 3, 2020.

SARIDE, Sireesh; AVIRNENI, Deepti; CHALLAPALLI, Subrahmanyam. Micro-mechanical interaction of activated fly ash mortar and reclaimed asphalt pavement materials. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 424-435, 2016.

SAVIETTO, Júlia Panzarin. **Análise de impactos ambientais da restauração de um pavimento asfáltico pela Avaliação do Ciclo de Vida**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SEVERO, C.G.S., LIRA, B.S., COSTA, D.L., MENEZES, R.R., NEVES, G.A. Ativação alcalina de resíduos minerais com NaOH. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 8.2, p. 106-109, 2013.

SILVA, C. F. S. C. **Reutilização do resíduo oriundo dos serviços de restauração asfáltica como material alternativo em camadas de pavimentos flexíveis**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2012.

SILVA, P. D., SAGOE-CRENSIL, K., SIRIVIVATNONOM, V. Kinetics of geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 512-518, 2007.

SINGH, N. B., MIDDENDORF, B. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. **Construction and Building Materials**, 237, 2020.

SINGH, S., RANSINCHUNG, G.D., DEBBARMA, S., KUMAR, P. Utilization of reclaimed asphalt pavement aggregates containing waste from Sugarcane Mill for production of concrete mixes. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 42–52, 2018.

SNIC. **Relatório Anual Indústria do Cimento**. Rio de Janeiro, 2013.

STURM, P., GLUTH, G.J.G., BROUWERS, H.J.H., KÜHNE, H.C. Synthesizing one-part geopolymers from rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 961–6, 2016. subgrade soil stabilized with alkali activated binder. **Road Materials and Pavement Design**, v. 23, p.1037-1060, 2022.

SUKPRASERT, S., HOY, M., HORPIBULSUK, S., ARULRAJAH, A., RASHID, A.S.A., NAZIR, R. Fly ash based geopolymer stabilisation of silty clay/blast furnace slag for subgrade applications. **Road Materials and Pavement Design**, v. 2, p. 357–71, 2021.

SUN, B., SUN, Y., YE, G., DE SCHUTTER, G. A mix design methodology of slag and fly ash-based alkali-activated paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 126, 104368, 2022.

SUN, B., YE, G., SCHUTTER, G. A review: Reaction mechanism and strength of slag and fly ash-based alkali-activated materials. **Construction and Building Materials**, v. 326, 2022.

SYED, M., GUHARAY, A., GOEL, D. Strength characterisation of fiber reinforced expansive TABYANGA, W., SUKSIRIPATTANAPONG, C., PHETCHUAY, C., LAKSANAKIT, C., CHUSILP, N. Evaluation of municipal solid waste incineration fly ash based geopolymer for stabilised recycled concrete aggregate as road material. **Road Materials and Pavement Design**, vol. 23, n. 9, p. 2178-2189, 2021.

TAHA, R.; et al. **Cement stabilization of reclaimed asphalt pavements aggregate for road bases and subbases**. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Miami, Maio/Junho, p. 239- 245, 2002.

TANG, N., ALREFAEI, Y., DAI, J.G. The implementation of geopolymer as an additive of warm-mix asphalt to reduce emissions. **In Proceedings of the CPS 2019-International Conference on Cleaner Production & Sustainability**, Hong Kong, China, 30 October–2 November, 2019.

TCHAKOUTÉ, H.K., RÜSCHER, C.H., KONG, S., KAMSEU, E., LEONELLI, C. Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: A comparative study. **Construction and Building Materials**, v.

114, p. 276–89, 2016.

TEMUJIN, J., VAN RIESSEN, A., WILLIAMS, R. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 167, n. 1–3, p. 82–88, 2009.

THOMAS, R.J., YE, H., RADLINSKA, A., PEETHAMPARAN, S. Alkali-activated slag cement concrete. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 38, n. 1, p. 33–38, 2016.

TONG, K.T., VINAI, R., SOUTSOS, M.N. Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 272–86, 2018.

TONINI, A.M., TONATTO, F.S., BRUSCHI, G.J, CONSOLI, N.C. Mechanical and Environmental Performance of Eggshell Lime for Expansive Soils Improvement. **Transportation Geotechnics**, v. 31, p. 100681, 2021.

TORGAL, F.P., JALALI, S. Ligantes geopoliméricos: uma alteraniva ao cimento Portland. **Ingenium**, p. 66-68, 2009.

TURNER, L.K., COLLINS, F.G. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 125-130, 2013.

VAN DEVENTER, J.S.J., PROVIS, J.L., DUXSON, P., BRICE, D.G. Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. **Waste Biomass Valorization**, v. 1, n. 1, pp. 145-155, 2010.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LUKEY, G. C. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. **Chemical Engineering Journal**, v. 89, n. 1-3, p. 63-73, 2002.

Van Tittelboom, K., De Belie, N. 2013. Self-healing in cementitious materials—A review. **Materials**, 6, 2182-2217.

VARGAS, A.S., DAL MOLIN, D.C.C., VILELA, A.C.F.; JALALI, S., CASTRO GOMES, J.P. Cinzas volantes álcali-ativadas com solução combinada de NaOH e Ca(OH)₂. **Revista Matéria**, v. 12, n. 3, pp. 462 – 469, 2007.

VENTURA, Anne; JULLIEN, Agnes. Life Cycle Assessment applied to road pavements: an analysis of method and results relevancy. 2009.

WALLAH, S.E.; RANGAN, B.V. **Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Longterm properties**. Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia, p. 107, 2006.

WANG, H.; LI, H.; YAN, F. Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 268, n. 1–3, p. 1-6, 2005.

WANG, S. D.; SCRIVENER, K. L.; PRATT, P. L. Factors affecting the strength of alkali-activated slag. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 6, p. 1033-1043, 1994.

WEIDEMA, Bo Pedersen; EKVALL, Tomas; HEIJUNGS, Reinout. Guidelines for application of deepened and broadened LCA. **Deliverable D18 of work package**, v. 5, p. 17, 2009.

WEIDEMA, Bo. Avoiding co-product allocation in life-cycle assessment. **Journal of industrial ecology**, v. 4, n. 3, p. 11-33, 2000.

WEILAND, Craig; MUENCH, Stephen. Life-cycle assessment of reconstruction options for interstate highway pavement in Seattle, Washington. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2170, p. 18-27, 2010.

WENG, L., SAGOE-CRENTSIL, K., BROWN, T., SONG, S. Effects of aluminates on the formation of geopolymers. **Materials Science and Engineering: B**, v. 117, n. 2, p. 163–168, 2005.

WIRTGEN. **Tecnologia de Reciclagem a Frio**. 1. ed. Windhagen: Wirtgen GmgH, 2012.

WIRTGEN. **Wirtgen cold recycling technology**, Windhagen, Germany, 2012.

XIE, Z., XI, Y. Hardening Mechanisms of an Alkaline-Activated Class F Fly Ash. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 9, p. 1245-1249, 2001.

XU, H. **Geopolymerisation of aluminosilicate minerals**. Melbourne: Tese de doutorado. The University of Melbourne, 2002.

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymerisation of alumino-silicate minerals. **International Journal of Mineral Processing**, v. 59, n. 3, p. 247-266, 2000.

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J. The Effect of the Alkalis Metals on the Formation of Geopolymeric Gels From alkali-Feldspars. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineer Aspects**, v. 216, p. 27-44, 2003.

_____. Microstructural characterisation of geopolymers synthesised from kaolinite/stilbite mixtures using XRD, MAS-NMR, SEM/EDX, TEM/EDX, and HREM. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 11, p. 1705-1716, 2002.

Yang, K. H., Song, J. K., Ashour, A. F., Lee, E. T., 2008. Properties of cement-less mortars activated by sodium silicate. **Construction and Building Materials**, 22, 1981-1989.

YANG, Z.T., MOCADLO, R., ZHAO, M.X. Preparation of a geopolymer from red mud slurry and class F fly ash and its behavior at elevated temperatures, **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 308–317, 2019.

YEO, Y.S. **Characterisation of Cement Treated Crushed Rock Basecourse for Western Australian Roads**. Thesis presented for the Degree of Doctor of Philosophy, Curtin University, School of Civil and Mechanical Engineering, 2011.

YEO, Y.S., JITSANGIAM, P., NIKRAZ, H. Dynamic Effects on Fatigue Life of Cement Treated Crushed Rock. **International Conference on Advances in Geotechnical Engineering**, Perth, Australia, 2011b.

YUN-MING, L., CHENG-YONG, H., AL BAKRI, M. M., HUSSIN, K. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. **Progress in Materials Science**, n. 83, p. 595-629, 2016.

ZAHARAKI, D.; KOMNITSAS, K.; PERDIKATSI, V. Use of analytical techniques for identification of inorganic polymer gel composition. **Journal of materials science**, v. 45, n. 10, p. 2715-2724, 2010.

ZHUANG, X.Y., CHEN, L., KOMARNENI, S., ZHOU, C.H., TONG, D.S., YANG, H.M. Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications. **Journal of Cleaner Production**, v.125, p. 253–67, 2016.

ANEXO A – RESULTADOS ESTATÍSTICOS

Síntese da análise estatística da resistência para Cimento Portland

MANOVA for Cimento

s = 1 m = 0,0 n = 35,0

Criterion	Test		DF		P
	Statistic	F	Num	Denom	
Wilks'	0,10056	321,984	2	72	0,000
Lawley-Hotelling	8,94399	321,984	2	72	0,000
Pillai's	0,89944	321,984	2	72	0,000
Roy's	8,94399				

MANOVA for Fresado

s = 1 m = 0,0 n = 35,0

Criterion	Test		DF		P
	Statistic	F	Num	Denom	
Wilks'	0,77947	10,185	2	72	0,000
Lawley-Hotelling	0,28293	10,185	2	72	0,000
Pillai's	0,22053	10,185	2	72	0,000
Roy's	0,28293				

MANOVA for Ciclos

s = 1 m = 1,0 n = 35,0

Criterion	Test		DF		P
	Statistic	F	Num	Denom	
Wilks'	0,26224	50,641	4	72	0,000
Lawley-Hotelling	2,81336	50,641	4	72	0,000
Pillai's	0,73776	50,641	4	72	0,000
Roy's	2,81336				

Síntese da análise estatística dos resultados de resistência para geopolímero

MANOVA for Geopolímero

s = 1 m = 0,0 n = 18,0

Criterion	Test		DF		P
	Statistic	F	Num	Denom	
Wilks'	0,95404	0,915	2	38	0,409
Lawley-Hotelling	0,04818	0,915	2	38	0,409
Pillai's	0,04596	0,915	2	38	0,409
Roy's	0,04818				

MANOVA for Silicato

s = 1 m = 0,0 n = 18,0

Criterion	Test		DF		P
	Statistic	F	Num	Denom	
Wilks'	0,22939	63,827	2	38	0,000
Lawley-Hotelling	3,35930	63,827	2	38	0,000
Pillai's	0,77061	63,827	2	38	0,000
Roy's	3,35930				

MANOVA for Ciclos

s = 1 m = 0,0 n = 18,0

Criterion	Test		DF		P
	Statistic	F	Num	Denom	
Wilks'	0,90112	2,085	2	38	0,138
Lawley-Hotelling	0,10972	2,085	2	38	0,138
Pillai's	0,09888	2,085	2	38	0,138
Roy's	0,10972				

Síntese da análise estatística da perda de massa

MANOVA for Cimento

s = 1 m = 0,0 n = 64,0

Criterion	Test		DF		P
	Statistic	F	Num	Denom	
Wilks'	0,31290	142,737	2	130	0,000
Lawley-Hotelling	2,19596	142,737	2	130	0,000
Pillai's	0,68710	142,737	2	130	0,000
Roy's	2,19596				

MANOVA for Fresado

s = 1 m = 0,0 n = 64,0

Criterion	Test		DF		P
	Statistic	F	Num	Denom	
Wilks'	0,96851	2,113	2	130	0,125
Lawley-Hotelling	0,03251	2,113	2	130	0,125
Pillai's	0,03149	2,113	2	130	0,125
Roy's	0,03251				

MANOVA for Ciclo

s = 1 m = 7,0 n = 64,0

Criterion	Test		DF		P
	Statistic	F	Num	Denom	
Wilks'	0,42022	11,210	16	130	0,000
Lawley-Hotelling	1,37972	11,210	16	130	0,000
Pillai's	0,57978	11,210	16	130	0,000
Roy's	1,37972				

MANOVA for Densidade

s = 1 m = 0,0 n = 64,0

Criterion	Test		DF		P
	Statistic	F	Num	Denom	
Wilks'	0,88163	8,727	2	130	0,000
Lawley-Hotelling	0,13427	8,727	2	130	0,000
Pillai's	0,11837	8,727	2	130	0,000
Roy's	0,13427				



UPF
UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br